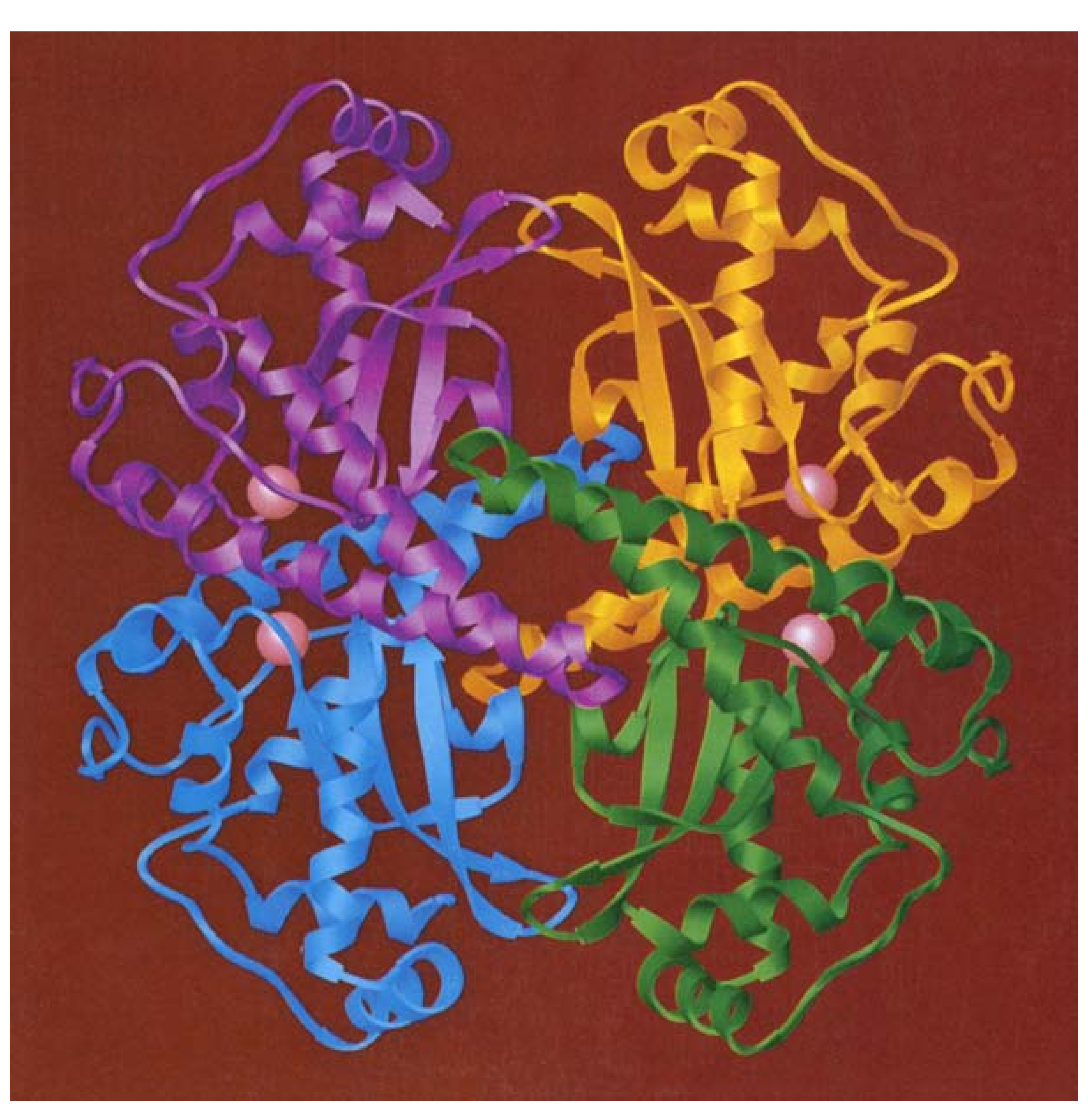
INVESTIGACION y CIENCIA

PUENTES PREFABRICADOS

LA VOZ HUMANA

ATOMOS DE ANTIMATERIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



INTERCEPTOR RADICAL

FEBRERO 1993
700 PTAS.



Febrero de 1993 Número 197

Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Roger Costa: *Antiprotones extremadamente fríos;* Santiago Torres: *Evolución molecular dirigida*; José Luis Comellas: *Lo que vio Colón en 1492*; Joan Fusté Clapés y José Traserra Parareda: *La voz humana*; Luis Bou: *Puentes prefabricados* y *Juegos matemáticos*; Joandomènec Ros: *Mente y significado en los monos*; Esteban Santiago: *¿Por qué envejecemos?*; J. Vilardell: *Hace...*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; Shigeko Suzuki: *De cerca*

Ciencia y sociedad:

Francesc Pedró, Joandoménec Ros, M. Prieto, Ramón Pascual, J. M. García de la Mora y Luis Bou

Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver, Ramón García Doménech y Jorge Gálvez Alvarez

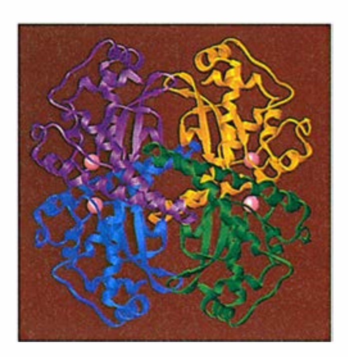
Libros:

Nicolás García Tapia, José M. Sancho, Jordi Agustí y Luis Alonso

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Portada: J. A. Tainer, G. E. O. Borgstahl, A. K. Shah y M. E. Pique, Inst. Scripps

Página	Fuente
7-12	José M. López Piñero
15-18	George Retseck
19	Gerald Gabrielse
20-21	George Retseck
23	Dan Wagner
24-29	Ian Worpole
42-44	Cortesía de la Biblioteca Pública de Nueva York
45	Museo Topkapi Saray, Estambul
46-47	Cortesía de la Biblioteca Pública de Nueva York
48	Theodore de Bry; cortesía de la Biblioteca Pública de Nueva York
51	Ross Marino/Retna Ltd.
52-55	Carol Donner
56-57	Robert T. Sataloff
59	Jean Muller
60	Eric Groize, P.L.S. (*arriba, centro y abajo a la izquierda*); Jean Muller (*arriba, centro y abajo a la derecha*)
61	Eric Groize, P.L.S.
62	Jean Muller (*arriba*), Eric Groize (*abajo*)
63	Jean Muller
64	Hervé This, P.L.S. (*arriba*), Eric Groize, P.L.S. (*abajo*)
65	Eric Groize, P.L.S.
67	Dean Lee/The Wildlife Collection
68-71	Patricia J. Wynne
72	Dean Lee/The Wildlife Collection (*izquierda*), Robert M. Seyfarth y Dorothy L. Cheney (*derecha*)
74-75	Robert Prochnow
76-77	James R. Smith, Baylor College of Medicine (*arriba*), Johnny Johnson (*abajo*)
78	Joseph L. Graves, Universidad de California en Irvine (*izquierda*), Stephanie Rausser (*derecha*)
79	Ken Abbott, Universidad de Colorado (*izquierda*), Sinclair Stammers/Science Photo Library/Photo Researchers, Inc. (*derecha*)
80	Tomo Narashima
81	Tomo Narashima (*izquierda*), Johnny Johnson (*derecha*)
82	Cindy L. Fisher, Michael E. Pique y Elizabeth D. Getzoff, Instituto de Investigación Scripps
88-89	Michael Field y Martin Golubitsky



LA PORTADA representa la imagen de la enzima manganeso superóxido dismutasa humana. La estructura ilustrada es la forma activa de la superóxido dismutasa presente en las mitocondrias de las células. A pesar de tales defensas, las lesiones oxidativas pueden acumularse en las mitocondrias y de este modo desempeñar un papel importante en la aparición del envejecimiento y en las afecciones relacionadas con la edad (véase "¿Por qué envejecemos?" por Ricki L. Rusting, en este mismo número) G. E. O. Borgstahl, H. E. Parge, M. J. Hickey, R. A. Hallewell y J. A. Tainer, del Instituto de Investigaciones Scripps, esclarecieron su estructura.

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal Garfella
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
M.ª Cruz Iglesias Capón
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Alan Hall, *Executive Editor*; Michelle Press, *Managing Editor*; Timothy M. Beardsley; Elizabeth Corcoran; Deborah Erickson; Marguerite Holloway; John Horgan, *Senior Writer*; Philip Morrison, *Book Editor*; Corey S. Powell; John Rennie; Philip E. Ross; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.
ADVERTISING DIRECTOR Robert F. Gregory
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CHAIRMAN OF THE BOARD Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	7.700	14.000
Extranjero	8.400	15.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 700 pesetas
Extraordinario: 900 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA

Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Pje. Jansana, 8 Bajos - 08902 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

... cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «En su campaña de 'recogida de sobras de grasa' para allegar nuevos recursos de glicerina y ácidos esteáricos, el gobierno recomienda que las amas de casa y los dueños de los restaurantes guarden las escurriduras de grasa para la defensa. Con esos residuos grasosos, el gobierno fabricará glicerina para explosivos, en sustitución de las importaciones de aceite de cacahuete de las Filipinas y otras islas del Pacífico. Pero existe otra fuente de suministro no tan ampliamente pregonada que ha venido abasteciéndonos de aceite para glicerina durante más de veinte años. Se trata de las sardinas y arenques, especies que tienen su hábitat en el Océano Pacífico desde Alaska hasta México, fuente ésta que ofrece una obvia ventaja en el hecho de que basta con ir a recogerla, sin que sea preciso plantarla y cultivarla antes.»

«La posibilidad de detener el progreso del tartamudeo es mucho mayor en la fase inicial, antes de que empiecen a desarrollarse sentimientos de ansiedad e inferioridad y antes de que los condicionamientos hayan tenido tiempo de surtir sus efectos. En buena medida la terapia es cuestión de atemperar el ritmo vital y suprimir los estímulos excitantes en el ambiente familiar, en especial las emociones y tensiones que crean unos padres neuróticos. Deben eliminarse las disputas familiares, los juegos excitantes, el hablar rápido, amén de otras pautas de reacción "nerviosa" por parte de los padres o los hermanos mayores. El niño tartamudo debe mantenerse en el estado físico mejor posible, disfrutar de períodos frecuentes de descanso y distensión, y evitar la fatiga. Además, puesto que en general el niño tartamudo muestra una disminución en su rendimiento psicomotriz, particularmente en aquellas funciones que requieren coordinación fina, se recomienda cierta dosis de trabajo rítmico.»

... cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «El hecho de que la gente que se pierde en el desierto o en la selva camine invariablemente en círculo se debe a una leve desigualdad en la longitud de las piernas. Cuidadosas medidas realizadas sobre un conjunto de esqueletos muestran que únicamente el diez por ciento tenían ambos miembros inferiores de la misma longitud, el treinta y cinco por ciento tenían el derecho más largo que el izquierdo, mientras que el cincuenta y cinco por ciento tenían la pierna izquierda más larga. El resultado de que una pierna sea más larga que la otra es que dará inconscientemente pasos más largos con el miembro más largo y, por tanto, tenderá hacia la derecha o la izquierda, según que el miembro más largo sea el izquierdo o el derecho, salvo, evidentemente, que la vista corrija la tendencia a la desviación.»

«Los tres millones de dólares que los fabricantes de sombreros del país han tenido que entregar al inventor de la badana para el sudor que se emplea en esas prendas revela a las claras cuánto vale el genio cuando acierta.»

«Cómo congelar agua a pequeña escala. Tómese un vidrio de reloj cóncavo y póngase su cara convexa en contacto con agua, de modo que quede una gota colgando. Viértase un poco de éter en la cara cóncava y sóplese. El éter se vaporizará con tal rapidez que el vidrio se enfriará hasta el punto de congelar el agua.»

«Los enormes avances de la electricidad en el comercio y la industria han sido hasta cierto punto emulados por sus aplicaciones a la medicina y cirugía. Uno de los nuevos logros más notables en la medicación eléctrica es la introducción de medicamentos en el cuerpo humano a través de la piel. Ello se lleva a cabo depositando en una esponja el medicamento disuelto en agua; la esponja, que hace las veces de polo positivo, se adosa a la piel. Al conectarse la corriente, el medicamento avanza impulsado hacia los tejidos atravesando la piel. La aplicación no es en absoluto dolorosa. De este modo se ha llevado cocaína hasta un nervio dolorido y se han aliviado neuralgias. Igualmente se han empleado otros fármacos. Esta propiedad de la electricidad se conoce como cataforesis. Además, se han realizado intervenciones quirúrgicas tras anestesiar, cataforéticamente, la piel y los tejidos contiguos.»

Cartas

Los fabricantes de hachas de piedra

Con ocasión del quinto centenario del descubrimiento de América, dos científicos norteamericanos y uno italiano publican en *Investigación y Ciencia* (septiembre de 1992, páginas 6-11) un artículo sobre los últimos fabricantes de hachas de piedra en Nueva Guinea, firmándolo N. Toth, D. Clark y G. Ligabue. En una espectacular introducción, se atribuyen el descubrimiento de una tribu de las altiplanicies de Nueva Guinea que, dicen, hasta 1984 no habría tenido ningún contacto con el resto del mundo; por añadidura, se apropian el primer estudio etnoarqueológico sobre la fabricación y la utilización de útiles de carnicería con hoja de piedra entre esos cultivadores que viven en la vertiente sur de la cordillera central del Iriandjaya. Si lo que dicen fuese cierto, trataríase, sin duda, de un documento extraordinariamente novedoso y que haría época en el ámbito de los estudios etnológicos y arqueológicos. Veamos qué hay en realidad de todo ello.

Las primeras prospecciones aéreas publicadas nos retrotraen a 1945 (Helmcke *et al.*, 1983), mas por aquella época no era aún posible el acceso al suelo, aunque ya se habían descubierto las roturaciones de terrenos, las huertas y los poblados de esos cultivadores de batatas, bananas y caña de azúcar, que habían alcanzado un nivel bastante alto de desarrollo. El 3 de septiembre de 1959 dos franceses se aventuran a atravesar a pie Nueva Guinea recorriéndola de norte a sur en una caminata de unos 600 kilómetros calculados a vuelo de pájaro, con el fin de establecer un primer contacto con los habitantes de los valles del Heime y del Eipomek (Delloye, 1977); a comienzos del año 1960 ambos viajeros pasan varios días en la región de Langda (que es hoy el nombre de un campo de aviación y de una misión cristiana). El 22 de junio de 1973, los primeros misioneros holandeses, volando en helicóptero desde Koropun, al oeste, aterrizan en Langda, donde se instalan definitivamente (Louwerse, 1987): termina, por tanto, el aislamiento de los kim-yal, los una y los eipo. Durante cuatro años, varios científicos alemanes, etnólogos, botánicos, zoólogos, médicos y geólogos, recorrerán toda la región y establecerán contactos duraderos, con permanencias incluso de años en aquellos altos valles para llevar a cabo un programa de investigaciones centralizado por el *Max-Planck Institut für Humanethnologie.* Desde 1983, esta región resulta ser una de las mejor documentadas de toda la isla de Nueva Guinea (Helmcke *et al.*, 1983; Michel, 1983; Swadling, 1983, entre otros muchos). Documentales filmados sobre la talla, el pulimento y los trueques de hojas de azuela en piedra pulimentada se publican desde 1985 (Koch, 1985; Simon y Schiefenhövel, 1985; Michel, 1985). La actividad de los misioneros se ha hecho ahora más eficiente y desde hace cinco años la fabricación de utensilios de piedra pulimentada no es ya más que un recuerdo, efectuándola sólo a tiempo parcial la última generación de especialistas, que únicamente tallan las piedras a demanda de los científicos y de los turistas.

Es asombroso que unos hombres de ciencia, tras brevísimo trabajar sobre el terreno en que han sido albergados por unos misioneros, hayan podido creer que en unos cuantos días se han hecho con la cabal comprensión de las sucesiones técnicas, el contexto social y el funcionamiento de los intercambios de las hachas en Nueva Guinea. Pero además, no contentos con atribuirse en falso un descubrimiento, acumulan en su artículo largas y triviales referencias aproximativas.

Este artículo, que no chocaría en un estudio publicado a comienzos del siglo XX (pero el contexto era entonces muy diferente), puede que haya sido también perpetrado para confundir al lector o en respuesta a las demandas de un determinado público ávido de sensacionalismo y ganoso de ver forzada la realidad. Cuesta mucho imaginarse que unos universitarios hayan podido desconocer las investigaciones anteriores y los trabajos recientes, tanto más cuanto que los misioneros holandeses de Langda les han hablado de todo ello sobre el terreno. En este caso, los científicos se han puesto en la situación de *exploradores*, como los que abundan desde hace algunos años y siempre se suceden en este mismo valle de Langda (Breton y Motte, 1991; Seveau y Fage, 1992) publicando relatos espectaculares y a veces bastante alejados de la realidad.

Los lectores podrán, en fin, dirigir su atención a escritos y filmes de carácter científico, o destinados a un público más amplio, que se han venido publicando estos últimos años (Pétrequin, Théry: de 1988 a 1991) y han sido realizados por la Misión Etnoarqueológica en Iriandjaya y por el CNRS, que desde 1984 investiga sobre las hachas y azuelas de piedra pulimentada sistematizando los estudios en todo el conjunto de la Nueva Guinea indonésica; Langda sólo es, de suyo, un ejemplo entre una treintena de otros que están actualmente documentados.

La realidad es lo bastante maravillosa como para que no se la tenga que deformar a sabiendas.

PIERRE Y ANNE-MARIE PÉTREQUIN
Centre National de la
Recherche Scientifique, París.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Cajal y la estructura histológica del sistema nervioso

La mitificación de Cajal ha conducido a una imagen tópica basada en varios supuestos que falsean gravemente la realidad

José M. López Piñero

Cajal es todo lo contrario de un "clásico" científico olvidado, tanto en España como en la comunidad científica internacional. En nuestra sociedad se ocupan continuamente de él libros, artículos periodísticos y trabajos de revistas especializadas, ha sido el tema de películas y series de televisión, tiene dedicadas calles en casi todas las poblaciones del país, se le han erigido numerosos monumentos y su mención resulta obligada en cuanto se habla de la investigación en España y de otros temas afines.

Su mitificación ha conducido a una imagen tópica del genial neurohistólogo basada en varios supuestos que falsean gravemente la realidad. Uno de ellos es que fue un investigador sin raíces en la historia científica de nuestro país, "surgido por generación espontánea", como llegó a decir Ortega y Gasset. Ello significa, por un lado, desconocer la tradición micrográfica española y, por otro, ignorar el ambiente, encabezado por Maestre de San Juan, en el que Cajal se inició en la observación microscópica. Otro de los supuestos minimiza la llamada Escuela Histológica Española, surgida en torno a la obra del gran investigador aragonés, y olvida los distintos grupos que la integraban, comenzando por no distinguir entre sus discípulos propiamente dichos y los autores influidos por él de forma menos directa.

JOSE M. LOPEZ PIÑERO es catedrático de Historia de la Medicina en la Universidad de Valencia. Discípulo de Laín Entralgo, completó su formación durante varios años en institutos de la disciplina de Alemania, Suiza y Gran Bretaña. Como investigador se ha dedicado preferentemente a la historia de las neurociencias y a la de la medicina en la España moderna y contemporánea.

Por otra parte, la pervivencia de la obra de Cajal en la comunidad científica internacional se debe a una razón muy clara: lo mismo que Darwin, Pasteur, Virchow, Mendel o Claude Bernard, Cajal creó uno de los modelos que hoy sirven de núcleos de cristalización a las ciencias biológicas. Concretamente, formuló el vigente en la actualidad acerca de la estructura del sistema nervioso y los mecanismos básicos de su funcionamiento.

De forma directa, la obra cajaliana constituye uno de los fundamentos de los saberes acerca de la anatomía, la fisiología y las enfermedades nerviosas y, de modo indirecto, una de las contribuciones centrales en las que se apoyan la concepción de los organismos vivos y las ciencias de la conducta. Por ello, no resulta extraño que sea una figura familiar para cualquier cultivador de las neurociencias y conocida, en mayor o menor grado, por los que se dedican a otras áreas de la biología, la medicina o la psicología.

La tradición micrográfica española

Los primeros micrógrafos españoles fueron varios miembros del movimiento *novator* que, en el último tercio del siglo XVII, introdujo en España la ciencia moderna. Destacó entre ellos el valenciano Crisóstomo Martínez, coetáneo de Malpighi, Leeuwenhoek y Hooke, el importante "microscopista clásico" de las estructuras óseas. A lo largo del siglo XVIII, la anatomía textural y la observación microscópica se cultivaron en nuestro país de modo continuado, desde los variados enfoques que expone María Luz Terrada en su monografía sobre el tema. Por el contrario, el profundo colapso que la vida científica española sufrió durante la guerra de la Independencia y el reinado de Fernando VII (1808-1833) redujo la actividad en este campo a la mera recepción libresca de las nuevas corrientes europeas.

El paso de esta asimilación puramente libresca a la recuperación de la micrografía práctica, de acuerdo con las nuevas teorías y los nuevos recursos técnicos, se inició en España en los años centrales del siglo XIX y se afianzó en la década siguiente.

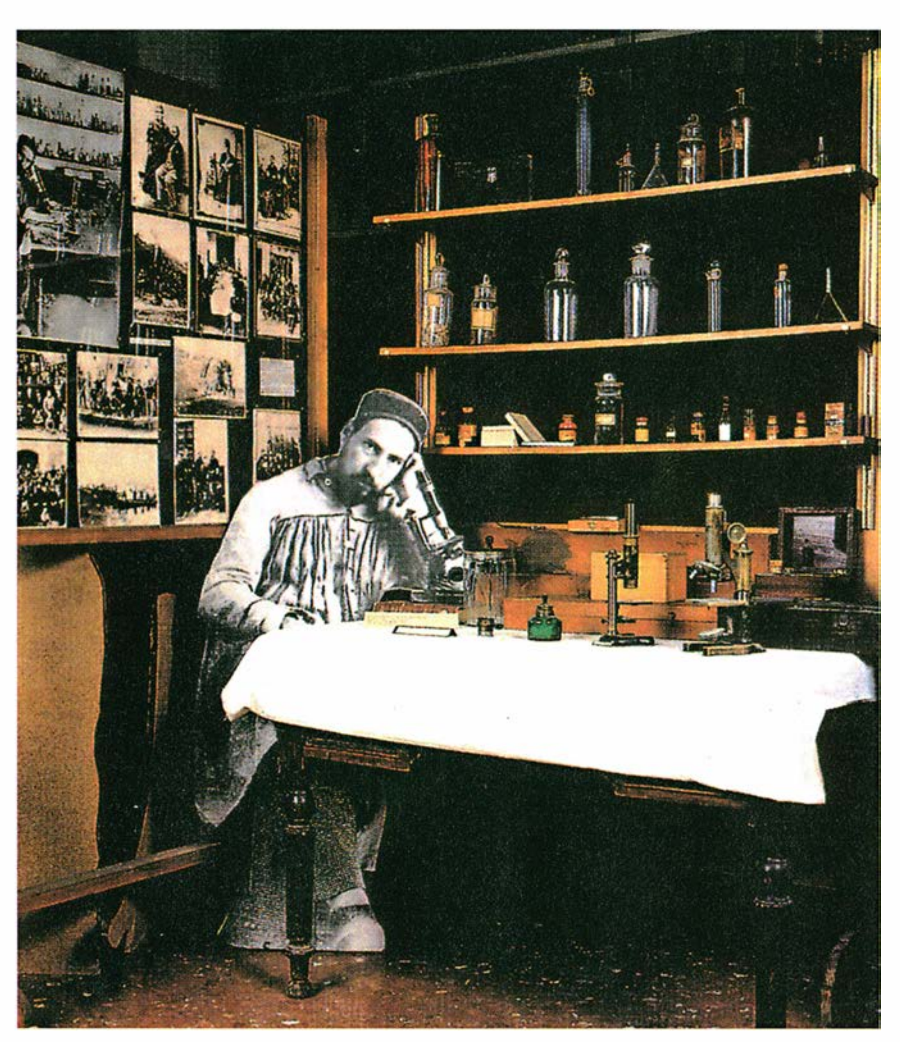
A dicho proceso contribuyeron notablemente personas y grupos científicos de vanguardia, situados más o menos al margen del mundo académico oficial. Aprovechando la completa libertad docente implantada por la revolución democrática de 1868, algunos de ellos fundaron instituciones privadas que contaron desde el principio con laboratorios o cátedras de anatomía microscópica. Como ejemplos típicos anotaremos el Instituto Biológico de Rafael Martínez Molina, quien fue el primero que apoyó la carrera científica de Cajal, y el Museo Antropológico de Pedro González de Velasco, en cuyo edificio se instalaría a comienzos del presente siglo el laboratorio en el que trabajaron el gran neurobiólogo y sus discípulos.

La importancia de los grupos extraoficiales no debe hacer olvidar

1. "ESQUEMA de la estructura del cerebelo. Cortes transversal y longitudinal de una lámina cerebelosa". Lámina mural diseñada por Cajal y pintada por R. Padró. Biblioteca y Museo Historicomédicos, Valencia. Cajal la diseñó con motivo de la serie de conferencias que pronunció en marzo de 1892 en la Academia de Ciencias Médicas, de Barcelona, bajo el título general de "Nuevo concepto de la histología de los centros nerviosos".



Esquema de la estructura del cerebelo. Corte transversal
Vista de plano de una célula de Purkinje.
C. Substancia blanca.
B. Capa de los granos.
Arborizaciones nerviosas que rodean los cuerpos de las células de Purkinje.
e. Células estrelladas superficiales.
h. Fibras musgosas.
n. Fibras trepadoras.
g. Granos cuyo cilindro-eje se bifurca en la capa molecular.
J. Células de neuroglia en forma de penacho.
m. Células neuroglicas de la capa de los granos.
f. Células estrelladas grandes de esta misma zona.
C
B
A
Esquema de una lámina cerebelosa. Corte longitudinal.
B. Capa de los granos.
C. Substancia blanca.
a. Cilindro-eje ascendente de un grano.
b. Bifurcación de este cilindro-eje y su continuación con una fibra paralela.
d. Célula de Purkinje vista de perfil.
e. Extremo de las fibras paralelas.
f. Cilindro-eje de una célula de Purkinje.
A
B
C
S.R. Cajal delineó.



2. RECONSTRUCCION del laboratorio de Cajal instalado en su domicilio de Valencia (1884). Biblioteca y Museo Historicomédicos, Valencia.

que algunos profesores de las universidades oficiales participaron tempranamente en el esfuerzo de incorporar de modo práctico las nuevas corrientes histológicas.

Sobresalió entre todos ellos Aureliano Maestre de San Juan (1828-1890), cabeza de la histología universitaria española anterior a Cajal. Maestre de San Juan se consagró a la histología a partir de 1860, fecha en la que pasó a ocupar una de las cátedras de anatomía de la Facultad de Medicina de Granada. Entre 1863 y 1867, completó su formación en diferentes laboratorios de Francia, Alemania y Gran Bretaña. Su prestigio pesó de modo decisivo en la dotación en dicha Facultad de la primera cátedra oficial española de histología (1873). Nombrado titular de la misma por concurso, Maestre realizó desde ella una labor didáctica ejemplar, no solamente doctrinal sino, sobre todo, práctica. En su laboratorio, tomaron contacto con las técnicas histológicas numerosos médicos españoles, entre ellos, el propio Ramón y Cajal.

De los demás cultivadores españoles de la anatomía microscópica coetáneos de Cajal que iniciaron su actividad en esta época, anotaremos únicamente la trayectoria inicial de Luis Simarro Lacabra (1851-1921). Simarro trabajó en el laboratorio micrográfico del Museo Antropológico de González de Velasco y enseñó en su Escuela Libre de Medicina y Cirugía. Más tarde, completó su formación asistiendo a los cursos y a las sesiones de la Sociedad Histológica Española fundada por Maestre. Desde 1880 a 1885 trabajó en París junto a figuras como Charcot y Magnan y se especializó en neuropsiquiatría. Fue entonces también discípulo de Ranvier, que orientó el punto de partida de su labor neurohistológica. De regreso a España, Simarro montó en Madrid un laboratorio histológico que, como vamos a ver, influyó de modo decisivo en la trayectoria de Cajal.

La obra neurohistológica de Cajal

Nacido en la aldea de Petilla de Aragón el año 1852, Santiago Ramón y Cajal fue hijo de un cirujano rural que con grandes esfuerzos llegó a conseguir el título de médico. Su niñez discurrió en una serie de pequeñas localidades del Alto Aragón. Tras estudiar el bachillerato en Jaca y Huesca, cursó medicina en una modesta "escuela provincial" creada en Zaragoza al amparo de la libertad docente implantada por la revolución democrática de 1868. Poco después de graduarse (1873) ganó unas oposiciones a médico militar y estuvo ocho meses en el ejército que operaba en Cataluña contra los carlistas. A continuación fue trasladado a Cuba, donde participó en la guerra colonial hasta su regreso a la península, a mediados de 1875.

Recuperado del paludismo que había contraído en Cuba, la influencia de su padre, que le había ya inclinado a convertirse en médico, pesó también en su decisión de dedicarse a la docencia universitaria de la anatomía. Su primer contacto con la histología se produjo en 1877, con ocasión de cursar en Madrid los estudios de doctorado. "Sugestionado —según el propio Cajal— por las 'bellas preparaciones micrográficas'" que le enseñaron Maestre de San Juan y López García, decidió dedicarse a la disciplina y, a su regreso a Zaragoza, gastó todos sus ahorros en instalar un modesto laboratorio micrográfico. Contra lo que suele afirmarse con frecuencia, su relación con Maestre y López García no se redujo a este contacto inicial. Volvió varias veces a su laboratorio en el curso de la siguiente década y durante la fase inicial de su obra fue un fiel seguidor de las ideas de Maestre, a quien dedicó en sus memorias un recuerdo muy expresivo.

Cajal fracasó en sus primeras oposiciones a cátedra en 1880, en las que sólo tuvo el apoyo de Martínez Molina, pero en 1883 ganó la de anatomía de la Facultad de Medicina de Valencia. Durante los casi cuatro años que estuvo al frente de la misma, Cajal se orientó en el mundo de la investigación. Publicó trabajos sobre diferentes tejidos, así como un *Manual de Histología*, cuyo primer fascículo apareció en 1884. Con motivo de la vacunación anticolérica de Jaime Ferrán, se ocupó también de cuestiones bacteriológicas en 1885. No obstante, acabó centrándose en la neurohistología, sobre todo después de una estancia en Madrid en 1887

como miembro de un tribunal de oposiciones. Visitó entonces los principales laboratorios micrográficos de la capital, entre ellos el de Luis Simarro, quien le enseñó el método de impregnación cromoargéntica de Camilo Golgi.

En el mismo 1887, la histología pasó del doctorado a la licenciatura. Se crearon nuevas cátedras de la materia y Cajal ocupó la de Barcelona hasta que, en 1892, fue trasladado a la de Madrid, de la que fue titular hasta su jubilación. En 1901, cuando ya era una figura de primera importancia en el mundo científico internacional, se le encargó la de dirección del Laboratorio de Investigaciones Biológicas, creado por el peso que tuvieron los premios y distinciones concedidas a su labor en el extranjero, que culminarían más tarde en la concesión del premio Nobel conjuntamente con Golgi (1906).

El nuevo concepto de la histología de los centros nerviosos

Siendo ya catedrático de histología, primero en Barcelona (1888-1892) y después en Madrid, Cajal convirtió el método de Golgi en la primera arma técnica de su obra de investigador, sobre todo después de introducir la modificación que denominó "proceder de doble impregnación", que permitía obtener tinciones más complejas. Por otra parte, consideró como "resorte principal" y "causa verdaderamente eficiente" de sus espectaculares descubrimientos la utilización del método ontogénico, es decir, el estudio de los centros nerviosos de embriones de ave y mamíferos, en lugar de comenzar directamente con los animales adultos, como hasta entonces se había hecho.

Explicó esta alternativa con una metáfora muy expresiva: "El (medio) más natural y sencillo al parecer, pero en realidad más difícil, consiste en explorar intrépidamente la selva adulta, limpiando el terreno de arbustos, plantas parásitas, y aislando cada especie arbórea tanto de sus parásitos como de sus congéneres. (...) Mas semejante táctica resulta poco apropiada en la dilucidación del problema propuesto, a causa de la enorme longitud y extraordinaria frondosidad del ramaje nervioso, que inevitablemente aparece mutilado y casi indescifrable en cada corte (...) Puesto que la selva adulta resulta impenetrable e indefinible, ¿por qué no recurrir al estudio del bosque joven, como si dijéramos, en estado de vivero? (...). Escogiendo bien la fase evolutiva (del embrión), las células nerviosas, relativamente pequeñas, destacan íntegras dentro de cada corte; las ramificaciones terminales del cilindroeje dibújanse clarísimas y perfectamente libres; los nidos pericelulares, esto es, las articulaciones interneuronales, aparecen sencillas, adquiriendo gradualmente intrincamiento y extensión; en suma, surge ante nuestros ojos, con admirable claridad y precisión, el plan fundamental de la composición histológica de la sustancia gris."

Sobre estas bases, Cajal se dedicó a la investigación, "no ya con ahínco, sino con furia". Su actividad científica durante 1888 y 1889 fue tan intensa que, para dar a conocer sus trabajos, además de enviar artículos a diferentes publicaciones periódicas, tuvo que editar a su costa una *Revista Trimestral de Histología Normal y Patológica*, de la que solamente aparecieron tres números. Sin embargo, los diez trabajos que publicó en ella abrieron una nueva etapa en el conocimiento de la estructura del sistema nervioso.

En el trabajo que inició dicha serie, titulado "Estructura de los centros nerviosos de las aves", Cajal demostró por vez primera con datos inequívocos que las ramificaciones de las neuritas no acaban en la sustancia gris en una red difusa, sino mediante arborizaciones libres. Lo consiguió, en concreto, al estudiar el axón de las llamadas *células estrelladas pequeñas* de la capa molecular del cerebelo. A esta observación crucial añadió, tres meses después, otros dos hallazgos de parecida importancia, en el artículo "Sobre las fibras nerviosas de la capa molecular del cerebelo": el primero fue el descubrimiento del axón de los *granos*, diminutas células de la corteza cerebelosa, que se divide a diversas alturas en ángulo recto, produciendo unas larguísimas proyecciones, que denominó *fibras paralelas* por discurrir paralelamente al sentido de la circunvolución cerebelosa; el segundo, el de las *fibras trepadoras* que, procedentes de los ganglios de la protuberancia, cruza sin ramificarse las capas de los granos para contactar con las células de Purkinje, elementos de grueso soma piriforme descritos por este gran histólogo checo en 1838. Ambos hallazgos volvieron a confirmar que la transmisión de los impulsos nerviosos se hacía por contacto, desmintiendo de modo terminante la teoría reticular.

Casi simultáneamente, en dos trabajos aparecidos en mayo y agosto de 1888, Cajal consiguió también reducir a los nuevos supuestos la estructura de la retina, que continuaría después investigando varios años hasta la aparición de su clásica monografía sobre el tema, primero en francés (1892) y luego en alemán (1894). El tercer territorio en el que demostró la individualidad de las células nerviosas y la terminación por contacto de sus prolongaciones fue la médula espinal, en la que concentró sus esfuerzos durante 1889.

Cajal se preocupó inmediatamente de difundir internacionalmente los resultados de sus investigaciones, con clara conciencia de que no bastaba enviar ejemplares de su revista o separatas de sus artículos a destacadas figuras científicas europeas. Por ello, a finales de 1889 y comienzos de 1890, publicó traducciones francesas de tres trabajos suyos donde exponía los hallazgos más importantes que había conseguido acerca de la estructura del cerebelo, la retina y la médula espinal. Sin embargo, la acogida que tuvieron estas publicaciones no pudo ser más decepcionante. La condición marginal de la actividad científica española en la biomedicina europea de la época y también las dificultades que la mayoría de los histólogos habían tenido al utilizar el método de Golgi contribuyeron, sin duda, a que los trabajos de Cajal fueran inicialmente recibidos con desconfianza. No obstante, la principal dificultad residía en la misma importancia de sus descubrimientos y en el hecho de que contradijeran frontalmente las ideas generalmente admitidas.

Para superar dicha desconfianza, Cajal decidió aprovechar el congreso que la Sociedad Anatómica Alemana iba a celebrar en Berlín a comienzos de octubre de 1889, mostrando en él las preparaciones más claramente demostrativas de sus descubrimientos. En dicho congreso, tras la lectura y discusión de las ponencias y comunicaciones orales, se dedicó un día a las demostraciones prácticas, sección en la que estaba inscrito Cajal. Según el testimonio de Van Gehuchten, Cajal estaba solo, "no suscitando en torno suyo sino sonrisas incrédulas. Todavía creo verlo tomar aparte a Kölliker, entonces maestro incontestable de la histología alemana, y arrastrarlo a un rincón de la sala de demostraciones, para mostrarle en el microscopio sus admirables preparaciones y convencerle al mismo tiempo de la realidad de los hechos que pretendía haber descubierto. La demostración fue tan decisiva que, algunos meses más tarde, el histólogo

de Würzburg confirmaba todos los hechos afirmados por Cajal".

El escepticismo inicial de Kölliker se convirtió en vivo interés cuando observó las clarísimas imágenes de las preparaciones del aragonés y éste le explicó —según anota en sus *Recuerdos*— "en un francés chabacano, menuda y pacientemente, todos los pequeños secretos de manipulación de la reacción cromo-argéntica". Inmediatamente después, Kölliker realizó una serie de trabajos de confirmación, utilizando la técnica de la doble impregnación, que le hicieron abandonar la teoría reticular y aceptar plenamente las concepciones de Cajal. Los dos primeros, dedicados al cerebelo y la médula espinal, aparecieron en 1890 en su propia revista, una de las más influyentes de la morfología de la época.

Kölliker se encontraba entonces en la cumbre de su prestigio científico, tras casi medio siglo de ejemplar dedicación a la investigación histológica. Su *Handbuch der Gewebelehre des Menschen* —cuya edición original apareció en 1852, el mismo año del nacimiento de Cajal— fue el primer tratado moderno de la disciplina. En consecuencia, no resulta extraño que su terminante respaldo a las contribuciones del investigador español pesara decisivamente en la trayectoria científica de éste.

Poco después que Kölliker, casi todas las grandes figuras de la neurohistología europea asimilaron los hallazgos de Cajal y aceptaron su nueva concepción de la estructura del sistema nervioso.

Estimulado por la acogida que su labor estaba obteniendo, Cajal trabajó de modo casi frenético durante 1890, año en el que publicó nada menos que diecinueve artículos, seis de los cuales aparecieron en francés en diferentes revistas morfológicas europeas. Entre otras aportaciones de menor interés, expuso en ellos sus primeras investigaciones sobre el cerebro de los mamíferos, la demostración de que la estructura de las vías olfatorias se ajustaba a la teoría de la neurona y, sobre todo, una serie de observaciones acerca del desarrollo embrionario de las células y las fibras nerviosas de la médula espinal y el cerebelo.

Polarización dinámica

Durante 1891 y los primeros meses de 1892, Cajal continuó realizando trabajos de carácter analítico, principalmente sobre la retina, el cerebro y los ganglios simpáticos. Formuló también entonces la ley de la polarización dinámica de las neuronas —una de sus aportaciones teóricas más perdurables— y ofreció una síntesis de su concepción de la estructura del sistema nervioso que alcanzó difusión internacional.

El problema de la dirección del impulso nervioso dentro de la neurona lo había examinado ya con anterioridad, pero no llegó a una formulación doctrinal madura hasta 1891, cuando dispuso de sólidas series de datos en que basarla y bajo el estímulo de un comentario de Van Gehuchten a sus opiniones sobre la materia. La expuso por vez primera en una comunicación que presentó al Primer Congreso Médico-Farmacéutico Regional celebrado en Valencia en julio de dicho año y que se publicó después en sus *Actas*. La tituló "Comunicación acerca de la significación fisiológica de las expansiones protoplasmáticas y nerviosas de las células de la sustancia gris" y es actualmente considerado un texto clásico crucial de las neurociencias contemporáneas. El propio Cajal también le concedió gran relieve dentro de su trayectoria científica y resumió la teoría de la polarización dinámica que se defiende en ella de la siguiente forma: "La transmisión del movimiento nervioso tiene lugar desde las ramas protoplásmicas hasta el cuerpo celular, y desde éste a la expansión nerviosa. El soma y las dendritas representan, pues, un aparato de recepción, mientras que el axón constituye el órgano de emisión y repartición".

La síntesis a la que nos hemos referido la ofreció Cajal en una serie de conferencias que pronunció en marzo de 1892 en la Academia de Ciencias Médicas, de Barcelona, bajo el título general de "Nuevo concepto de la histología de los centros nerviosos". Su texto apareció originalmente en varios números de la *Revista de Ciencias Médicas de Barcelona* y luego fue reunido en un folleto. Casi inmediatamente se publicó una traducción alemana por iniciativa de His y con un prefacio suyo. Poco después lo hizo una traducción francesa, precedida de un prólogo de Mathias Duval, que tuvo tal éxito que se agotaron en un trimestre dos copiosas ediciones. El traductor fue en este caso León Azoulay, el mismo que se encargaría dos décadas después de la versión de la *Textura del sistema nervioso*, la principal obra de Cajal. La acogida que tuvo esta primera síntesis fue precisamente uno de los factores que más pesaron en su decisión de escribir el gran tratado.

En 1892, el mismo año de su traslado a Madrid, apareció la versión francesa del principal estudio monográfico que Cajal dedicó a la retina. Fue publicado por la revista belga *La Cellule* con el título de *La rétine des vertébrés* e incluía, ampliados e ilustrados con nuevas figuras, todos los hallazgos sobre el tema que ha-

3. ILUSTRACIONES de la comunicación de Cajal al Congreso Médico Farmacéutico Regional celebrado en Valencia en 1891, en la que expuso por vez primera la ley de la polarización dinámica de las neuronas.

bía ido dando a conocer hasta entonces en artículos en castellano. Durante sus primeros cinco años de estancia en la capital continuó investigando con el método de Golgi la estructura de otras zonas de sistema nervioso. El resultado general fue comprobar, en todas ellas, la teoría de la neurona —es decir, el contacto entre somas y arborizaciones nerviosas—, así como la ley de la polarización dinámica. En 1896, un año en el que se dedicó de manera particularmente intensa al trabajo de laboratorio, comenzó a utilizar el método de Ehrlich, técnica que permite teñir en vivo, o casi en vivo, las fibras y células nerviosas. Con las imágenes clarísimas de color azul intenso que obtuvo aplicándolo, consiguió contrarrestar la desconfianza de algunos histólogos escépticos que habían insinuado la posibilidad de que algunas tinciones con el cromato de plata fuesen "artefactos".

Trabajos teóricos

Redactó también entonces algunos trabajos de carácter teórico, el más importante de los cuales fue la comunicación *Consideraciones generales sobre la morfología de la célula nerviosa*, que envió al Congreso Internacional de Medicina celebrado en Roma en 1894. Su tesis central es que la ontogenia (o desarrollo embrionario) del sistema nervioso reproduce de modo abreviado, con algunas simplificaciones y saltos, su filogenia (o desarrollo evolutivo de las especies). Se trata, por lo tanto, de una aplicación directa de la ley biogenética fundamental, núcleo de la morfología darwinista.

Cajal afirmó que, a lo largo del desarrollo filogénico de los vertebrados, se advierte siempre la presencia simultánea de un sistema nervioso sensorial y otro cerebro-cortical, perfeccionándose este último no sólo por extensión sino por diferenciación estructural y morfológica de sus elementos. De acuerdo con este modelo de progreso morfológico, "la excelencia intelectual (...) no depende de la talla o caudal de las neuronas cerebrales, sino de la copiosidad de sus apéndices de conexión, o en otros términos, de la complejidad de las vías de asociación a cortas y a largas distancias". Tres años más tarde reelaboró este modelo evolucionista en un artículo titulado "Leyes de la morfología y dinamismo de las células nerviosas", en el que expuso, además, una nueva formulación de la ley de la polarización dinámica de las neuronas.

El propio Cajal consideró en su madurez que, en estos trabajos teóricos, "la elaboración especulativa sigue muy de cerca al hecho de observación" y que los modelos que defienden corresponden a "legítimas inducciones o hipótesis plausibles". En cambio, se arrepintió de otro artículo suyo de 1895 sobre "el mecanismo histológico de la asociación, ideación y atención", al que llamó "aventuradísima lucubración en la que campea, muy a su sabor y talante, la loca de la casa".

La obra de Cajal, que había ya alcanzado amplia difusión y prestigio en los ambientes científicos del continente europeo, recibió en 1894 el reconocimiento formal de la comunidad científica británica. A comienzos de dicho año fue invitado a pronunciar la "Croonian Lecture" por la Royal Society. En Londres se hospedó en la casa de Charles Scott Sherrington, que estaba entonces iniciando la labor de investigación que lo convertiría en la máxima figura de la neurofisiología del siglo XX. Sus aportaciones fisiológicas se basaron de modo sistemático en la obra de Cajal acerca de la estructura del sistema nervioso, hasta el punto de que varios términos hoy generalmente utilizados para designar algunas de las concepciones básicas del histólogo aragonés fueron neologismos acuñados por él. El más importante, el de *sinapsis*, lo propuso inicialmente en 1897, al resumir las ideas de Cajal acerca de la conexión por contacto y no por continuidad entre las células nerviosas.

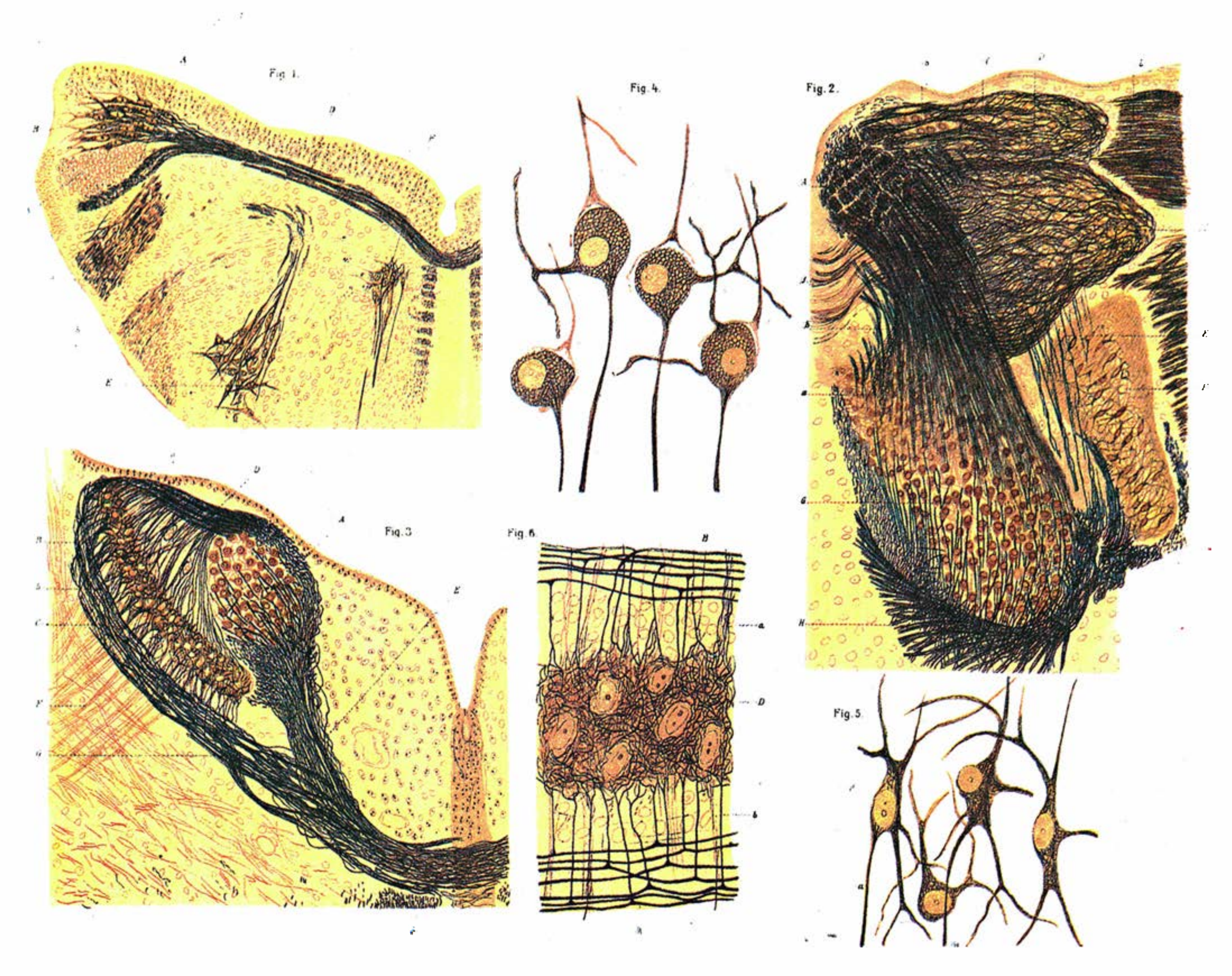
En su madurez, Sherrington reconoció en los siguientes términos el apoyo de la neurofisiología en la obra de Cajal: "¿Sería mucho decir que fue el anatómico del sistema nervioso más grande que se ha conocido? Durante mucho tiempo esa materia fue el tema favorito de los mejores investigadores; antes de Cajal se hicieron descubrimientos, pero éstos a menudo dejaban al médico más confuso que antes, aumentando el desconcierto. Cajal, en cambio, hizo posible, incluso para un bisoño, reconocer con una ojeada la dirección que toma la corriente nerviosa en la célula viva y en la cadena compleja de células nerviosas. Resolvió de una vez el gran problema de la dirección de las corrientes nerviosas en su recorrido a través del cerebro y la médula espinal...".

En su "Croonian Lecture", Cajal resumió sus hallazgos e ideas en francés, con el título de *La fine structure des centres nerveux*. Como solía hacerse con los invitados a esta conferencia, fue nombrado doctor *honoris causa* por la Universidad de Cambridge. La ceremonia de investidura se hizo de acuerdo con la devoción inglesa por lo tradicional. El elogio del nuevo doctor pronunciado en latín por el *orator* terminó con un juego de palabras en honor de las tinciones argénticas de Cajal: el poeta hispanorromano Marcial, nacido también en Aragón, ya había "aprendido por experiencia que en la vida no puede hacerse casi nada sin plata" ("*expertus didicit fere nihil in vita sine argento posse perfici*").

La "Textura del sistema nervioso del hombre y de los vertebrados"

En 1897, Cajal inició la publicación, por una parte, de la *Revista Trimestral Micrográfica* y, por otra, del gran tratado *Textura del sistema nervioso del hombre y de los vertebrados*. La primera se convirtió desde entonces en el principal medio que fue dando a conocer su labor de investigación personal y la de su escuela. Apareció hasta 1901, fecha en la que fue continuada por Trabajos de Laboratorio de Investigaciones Biológicas de la Universidad de Madrid, que se editó con presupuesto oficial a partir de la fundación del centro de este nombre. La *Textura del sistema nervioso* fue su libro más importante "mi obra magna".

El proyecto de redactar este libro, tal como adelantamos, fue en buena parte consecuencia de la extraordinaria acogida que tuvieron las ediciones castellana, alemana y francesa de su síntesis de 1892. Concibió entonces el proyecto de "escribir un libro extenso donde se estudiara sistemática y minuciosamente la textura del sistema nervioso de todos los vertebrados y se diera cuenta, con los necesarios desarrollos, de la totalidad de mi obra científica". La *Textura del sistema nervioso del hombre y los vertebrados* —principal aportación de nuestro idioma a los grandes textos clásicos de la ciencia contemporánea— fue publicado en Madrid, entre 1897 y 1904, por la Imprenta y Librería de Nicolás Moya, una de las empresas editoras de libros médicos más importantes de la España de la época. Consta de dos volúmenes, el primero de casi seiscientas páginas y el segundo de más de mil doscientas. Como muchos otros textos científicos de este período, entre ellos el *Manual de Histología* del propio Cajal, fue apareciendo por fascículos desde 1897 a 1904. Cinco años después de esta última fecha



4. ENTRE LOS NUMEROSOS trabajos que Cajal y sus discípulos realizaron con el método del nitrato de plata reducido —que permite ver la estructura interna de las células nerviosas— figura el dedicado a los ganglios terminales del nervio acústico de las aves (1908), al que corresponde este grabado. Dibujado, como de costumbre, por el propio Cajal, es una de las más bellas cromolitografías que aparecieron en su revista: *1*, corte frontal de la región acústica bulbar de un embrión de pollo de seis días. *2*, Corte frontal de ganglios cocleares de un gorrión de quince días. *3*, Corte frontal de ganglios acústicos de un gorrión de quince días. *4*, Neuronas del núcleo de grandes células. *5*, Células estrelladas procedentes de la región cefálica de dicho núcleo. *6*, Detalles de plexos terminales en el foco laminar.

comenzó a publicarse en París la traducción francesa de la gran obra de Cajal, con el título de *Histologie du système nerveux de l'homme et des vertébrés* (1909-1911). Se trataba de un texto "revisado y puesto al día por el autor", que tradujo León Azoulay, quien ya había vertido al francés otras obras del neurohistólogo aragonés, como sabemos. La principal novedad técnica en el lapso de tiempo transcurrido entre ambas ediciones fueron los llamados métodos de tinción neurofibrilares. De su aplicación proceden fundamentalmente los cambios, casi siempre adiciones, que introdujo Cajal en la edición francesa.

En esta colosal síntesis de neurohistología comparada, Cajal continuó fiel a los supuestos básicos de la morfología evolucionista, desarrollando las formulaciones a las que hemos aludido al comentar sus trabajos teóricos anteriores. Como en el caso de John Hughlings Jackson —creador de otro de los paradigmas de las neurociencias de nuestro siglo— la fuente intelectual básica del evolucionismo de Cajal es la obra de Herbert Spencer. Entre las ediciones de sus libros que cita figuran, por supuesto, las traducciones castellanas de Miguel de Unamuno.

La estructura interna de la celula nerviosa. La degeneración de los nervios

Cuando terminó la publicación de su gran obra *La textura del sistema nervioso*, en 1904, Cajal había alcanzado brillantemente la meta que se había propuesto con el examen sistemático de todos los territorios nerviosos con el método de Golgi: demostrar la individualidad de las neuronas, aclarar su comportamiento genético y ofrecer un modelo estructural del funcionamiento del sistema. Sin embargo, se le había planteado poco antes la necesidad de conocer la estructura interna de la célula nerviosa, problema para el que le resultaba necesaria una nueva técnica.

Dicha necesidad pasó a primer plano porque se hicieron críticas frontales a la teoría de la neurona, reformulando la teoría reticular sobre la base de que las neurofibrillas que existían en el seno de las células nerviosas formaban una red continua interneuronal que sería responsable de la propagación del impulso ner-

vioso. Aunque desde hacía tiempo se venía hablando de forma imprecisa de tal urdimbre neurofibrilar, la cuestión no se planteó en estos términos hasta los primeros años del presente siglo, tras los trabajos en invertebrados del húngaro István Apáthy y, sobre todo, a partir de las indagaciones sobre las neurofibrillas del sistema nervioso de los vertebrados realizadas por el profesor de Estrasburgo Albrecht Bethe, quien se convirtió en la cabeza del nuevo reticularismo, con el apoyo algo posterior de Hans Held, traductor de la primera síntesis de Cajal. Muchos neurohistólogos pusieron en duda la teoría de la neurona y algunos la abandonaron abiertamente, situación a la que aludió Golgi en su conferencia Nobel.

Convencido de que la solución del problema residía en "contemplar las susodichas neurofibrillas en preparaciones irreprochables", cosa que en modo alguno habían conseguido Bethe y sus seguidores, Cajal trabajó intensamente en busca de la técnica de tinción apropiada. Tras numerosos ensayos infructuosos la encontró, por fin, en octubre de 1903, partiendo del "proceder fotográfico" original de Luis Simarro, que había conseguido con él impregnar las neurofibrillas mediante las sales fotográficas de plata. Ideó de esta forma el célebre método del nitrato de plata reducido, consistente básicamente en la inmersión directa de los tejidos nerviosos en nitrato de plata, mantenimiento de los mismos en estufa durante cuatro días, y reducción en bloque y en la oscuridad de la sal argéntica mediante un baño de ácido pirogálico.

El método del nitrato de plata reducido fue utilizado sistemáticamente durante una década por Cajal y sus discípulos, dando como primer resultado el conocimiento de la disposición de las neurofibrillas en el protoplasma nervioso y en las arborizaciones pericelulares. En el trienio 1905-1907, Cajal lo aplicó asimismo al estudio de la regeneración y la degeneración de los nervios y de las vías nerviosas centrales, tema que había sido una de las principales fuentes de los argumentos de los autores opuestos a la teoría neuronal. Defendían éstos que la regeneración del segmento distal de un nervio seccionado se debe a la transformación de las células de revestimiento del mismo que habían persistido tras la degeneración de sus fibras. Frente a esta hipótesis, Cajal demostró que las fibras nuevas que aparecen en dicho segmento distal son brotes axónicos procedentes del cabo central, cuyas fibras mantienen su vitalidad porque siguen unidas al soma neuronal. Sus investigaciones sobre esta cuestión fueron más tarde recogidas en dos volúmenes titulados *Estudios sobre la degeneración y regeneración del sistema nervioso* (1913-1914).

A partir de 1907, Cajal aplicó su técnica de tinción a investigaciones comparadas de la textura del cerebelo y del bulbo raquídeo, al estudio de la génesis de los nervios motores y sensoriales y las expansiones neuronales en el embrión, así como al análisis de la estructura del núcleo neuronal. Como consecuencia de tan amplia labor, el neuronismo logró superar por completo las críticas que le habían planteado los nuevos defensores del reticularismo.

Ultimas aportaciones. Los centros nerviosos de los insectos. Testamento científico

Cuando ya había cumplido los sesenta años, en 1912 y 1913, Cajal ideó todavía dos nuevos métodos de tinción: la técnica del formol-urano y la del oro-sublimado. Con la primera consiguió precisar numerosos detalles acerca de la disposición, fases evolutivas y conexiones del aparato de Golgi, retículo endoneuronal que el histólogo italiano había observado por vez primera a finales del siglo XIX. Con la segunda resolvió el problema de la impregnación de un tipo de neuroglía, es decir, del tejido que forma la sustancia de sostén de los centros nerviosos, que era especialmente difícil de teñir con los métodos anteriores: la llamada neuroglía protoplásmica o de radiaciones cortas. Esta innovación resultaría decisiva para las investigaciones que sobre la glioarquitectonia desarrollaron después Nicolás Achúcarro y Pío del Río Hortega, otras dos grandes figuras de la neurohistología española.

Entre sus trabajos posteriores destacan las investigaciones que realizó a partir de 1915 en torno al ojo y la retina de los insectos, que realizó en gran parte en colaboración con Domingo Sánchez. Su resultado, junto a la crisis experimentada por el darwinismo durante el período de entreguerras, le condujo a un cierto distanciamiento de la explicación darwinista de las formas anatómicas a lo largo de la serie filogénica: "No debo ocultar —afirmó en sus *Recuerdos*— que en el estudio de la retina sentí por vez primera flaquear mi fe darwinista (hipótesis de la selección natural), abrumado y confundido por el soberano ingenio constructor que campea, nos sólo en la retina y en el aparato dióptrico de los vertebrados, sino hasta en el ojo más ruin de los insectos".

La principal ilusión científica de Cajal, durante la fase final de su vida fue la publicación de una tercera edición, ampliada y actualizada, de su gran libro *Textura del sistema nervioso*. Llegó incluso a redactar las condiciones de publicación de la misma, para la que fue reuniendo abundantes materiales y notas que desaparecieron por razones no bien aclaradas, pérdida que aceleró su muerte. Llegó, sin embargo, a redactar un amplio trabajo de conjunto sobre la teoría de la neurona, de casi cien páginas, con destino al primer volumen del *Handbuch der Neurologie* dirigido por O. Bumke y O. Foerster. La publicación de este texto, verdadero testamento científico de Cajal, se retrasó más de lo previsto, con gran contrariedad de su autor. Por ello publicó en 1933 una nueva redacción en castellano en la revista *Archivos de Neurobiología*, con el título de "¿Neuronismo o reticularismo? Las pruebas objetivas de la unidad anatómica de las células nerviosas", apareciendo además una versión francesa de la misma al año siguiente en el anuario del Laboratorio de Investigaciones Biológicas. El texto original traducido al alemán, *Die Neuronenlehre*, lo hizo de forma póstuma en 1935, tal como temía Cajal. En la conclusión de esta síntesis, que coronaba una labor de medio siglo, subrayó que el principal resultado general de la misma era superar el último y más difícil reducto que se oponía al modelo celularista de organismo, a su concepción como "asociación de células relativamente autónomas": "No temamos, pues, que al embate de los reticularistas, la vieja y genial concepción de Virchow sufra quebrantos".

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CAJAL Y SU LABOR HISTOLÓGICA. Jorge Francisco Tello. Universidad Central, 1935.

SANTIAGO RAMÓN Y CAJAL O LA PASIÓN POR ESPAÑA. Agustín Albarracín Teulón. Labor, 1978.

CAJAL. ANTOLOGÍA. Edición y estudio introductorio por José M. López Piñero. Península, 1986.

RAMÓN Y CAJAL. José M. López Piñero. 2ª edición. Salvat, 1988.

Antiprotones extremadamente fríos

Estas partículas, capturadas y enfriadas a energías 10^{10} veces las que podían conseguirse hace seis años, deben posibilitar la producción de los primeros átomos de antimateria

Gerald Gabrielse

¿Cómo puede almacenarse un antiprotón? Se cree que el antiprotón, análogo en la antimateria al protón corriente (bloque constituyente de la materia ordinaria, junto con el electrón y el neutrón), posee la misma cantidad de carga que el protón, aunque negativa. El simple choque de un protón con un antiprotón puede aniquilar ambas partículas, produciendo un estallido de energía en el que se forma una diversidad de partículas, piones en su mayoría. Significa ello que los antiprotones no pueden encerrarse en un recipiente ordinario, ni tampoco entrar en contacto con los átomos de la atmósfera. La única manera de almacenar un antiprotón es en un vacío casi perfecto, donde los campos eléctricos y magnéticos creen una cámara sin paredes.

Los últimos años registran un notable incremento de la capacidad de enfriar y almacenar antiprotones. Las técnicas de almacenamiento por medio de campos magnéticos han sido usuales desde hace años. Ahora bien, en los aceleradores dispuestos para ello, los antiprotones alcanzan una temperatura altísima y se desplazan a velocidades que se aproximan al límite marcado por la velocidad de la luz, con una energía elevadísima, entre los mil millones y el billón de electronvolts (de 1GeV a 1TeV). Velocidades y energías tan elevadas son aceptables, e incluso deseables, en experimentos en los que se hace chocar los antiprotones con otras partículas, pero en otros no menos interesantes se requieren antiprotones "fríos", que se muevan lentamente y posean una baja energía. Estos últimos son necesarios para someter a rigurosa prueba nuestros conocimientos de la materia y la antimateria, así como las teorías que subyacen en la naturaleza de ambas.

Recientemente, un pequeño equipo internacional del que yo formo parte se demostró capaz de frenar y enfriar antiprotones hasta energías de 10^{-10} veces el mínimo que podía alcanzarse hace tan sólo seis años. Es posible almacenar antiprotones fríos todo el tiempo que se quiera, incluso varios meses, en vacío casi perfecto dentro de un volumen inferior a un milímetro cúbico. La energía media de los antiprotones, muy baja —menos de una milésima de electronvolt—, se expresa en unidades de temperatura. (Un cuarentavo de electronvolt corresponde a la temperatura ambiente.) Los antiprotones contenidos en nuestro dispositivo de almacenamiento tienen una temperatura de sólo cuatro grados sobre el cero absoluto (cuatro kelvins).

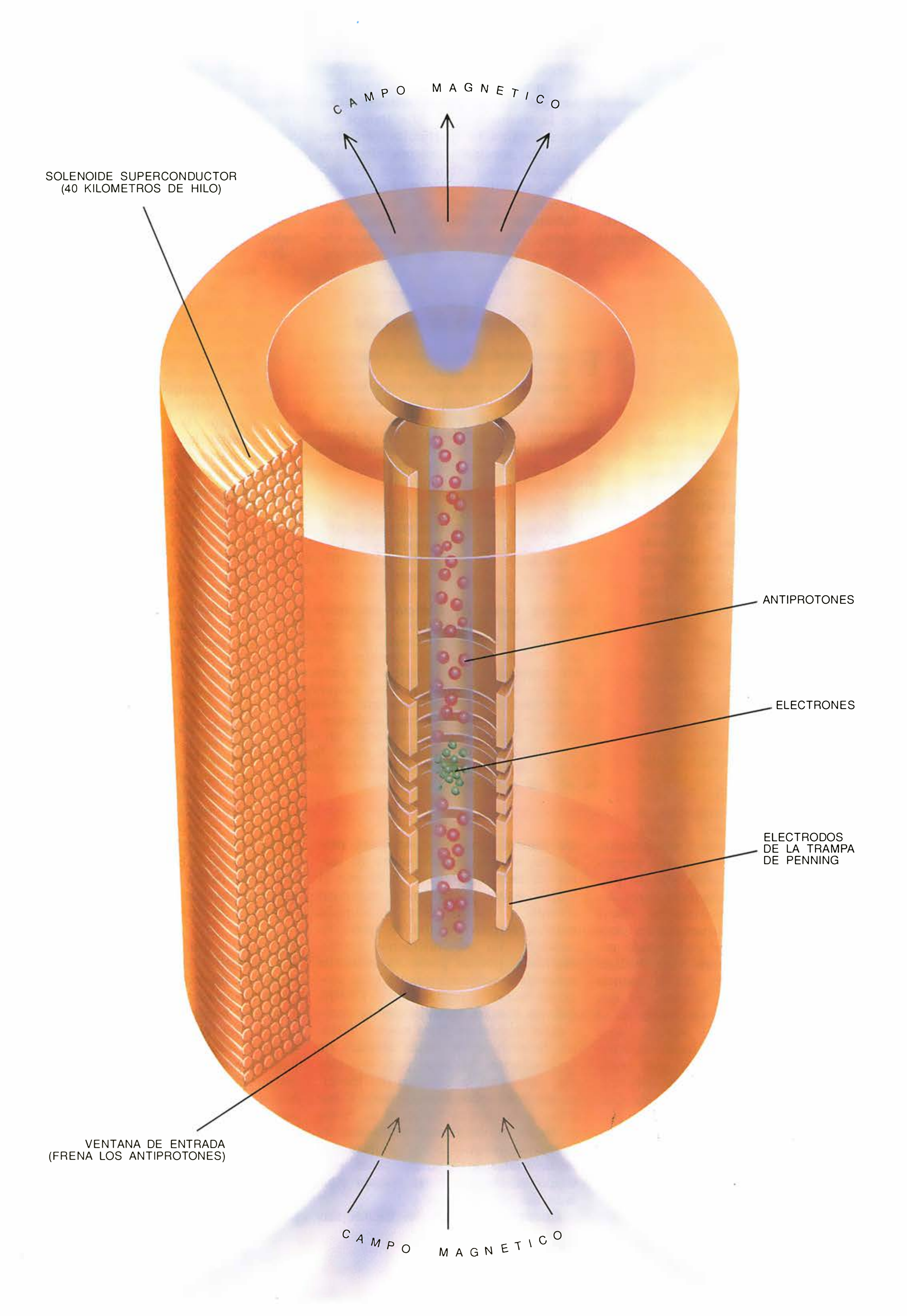
Se utilizan ya antiprotones extremadamente fríos para comparar las cargas y las masas de antiprotones y protones con precisión más de 1000 veces superior a la que hasta ahora podía lograrse. Tales comparaciones suponen una prueba muy exigente del teorema de la física de partículas denominado *PCT*, según el cual el antiprotón y el protón deben tener masas idénticas y cargas que sólo difieran en el signo. Esperamos que en los próximos años se consiga una mejora de precisión sustancial. Los antiprotones fríos podrán, a buen seguro, utilizarse para obtener los primeros átomos de antimateria: combinando un antiprotón con un positrón o antielectrón, debería producirse antihidrógeno.

Los antiprotones sólo aparecen en la naturaleza como productos infrecuentes de las colisiones entre rayos cósmicos de alta energía y átomos de la atmósfera. Aunque estables (no se desintegran espontáneamente en otras partículas), su vida es muy breve, y al poco tiempo de haberse originado se aniquilan en las colisiones con los protones existentes en la atmósfera.

Se crean artificialmente antiprotones en los aceleradores a través de la colisión violenta de protones de altísima energía con materia sólida. El CERN, el laboratorio europeo de física de partículas próximo a Ginebra, provocó colisiones entre grandes cantidades de antiprotones y de protones a fin de observar y estudiar las partículas *W* y *Z*, de corta vida. En el Laboratorio Fermi del Acelerador Nacional (Fermilab), en Batavia, se investigan las colisiones entre antiprotones y protones a energías aún más elevadas, continuando así una larga búsqueda del quark cima ("top"). Esta partícula es el único miembro de un grupo de seis componentes de partículas pesadas (tales

GERALD GABRIELSE enseña mecánica cuántica en la Universidad de Harvard. Se doctoró en 1978 en la Universidad de Chicago y estuvo hasta 1987 en la de Washington. Dirige, desde sus comienzos, los trabajos orientados a la producción y el uso de antiprotones extremadamente fríos, además de investigar en monoelectrónica y sistemas acoplados de osciladores electrónicos, espectroscopía de masas, experimentos con positrones y la recombinación relativa a la obtención de antiprotones.

1. TRAMPA DE IONES para capturar antiprotones (*rojo*), que se enfrían por choques con electrones fríos (*verde*). Los antiprotones y los electrones se retienen mediante campos eléctricos y magnéticos; el campo eléctrico se produce aplicando diferencias de potencial entre electrodos; el campo magnético lo genera un solenoide, o bobina superconductora (no está a escala).


CAMPO MAGNETICO
SOLENOIDE SUPERCONDUCTOR
(40 KILOMETROS DE HILO)
ANTIPROTONES
ELECTRONES
ELECTRODOS
DE LA TRAMPA
DE PENNING
VENTANA DE ENTRADA
(FRENA LOS ANTIPROTONES)
CAMPO MAGNETICO

como los protones) que hasta ahora no ha podido observarse.

En 1982 se acometieron nuevos experimentos con antiprotones, una vez que en el CERN se aprovecharon partes de anteriores anillos de almacenamiento para completar el anillo de antiprotones de baja energía ("Low Energy Antiproton Ring", LEAR). La circunferencia del LEAR, de sólo 79 metros, resulta diminuta frente a la circunferencia de 85 kilómetros del supercolisionador superconductor de 20 TeV que está en proyecto. El LEAR frena y enfría los antiprotones hasta una energía de seis millones de electronvolts (MeV), que corresponde a una velocidad aproximada del 10 % de la velocidad de la luz.

Nuestro aparato, capacitado para enfriar antiprotones a energías diez mil millones (10^{10}) de veces inferiores a la alcanzada en el LEAR, es tan pequeño que entra en el dominio de "sobremesa". Presenta el inconveniente de que hay que conectarlo a una serie de grandes aceleradores de física de partículas, las máquinas del CERN por ejemplo, que puedan suministrarle antiprotones con energías de algunos MeV.

En 1981 acudí al Fermilab con la esperanza de explorar la posibilidad de capturar y almacenar antiprotones extremadamente fríos. Funcionaba en el laboratorio un pequeño anillo de almacenamiento que parecía adaptable al proyecto. Por desgracia, la intensa dedicación al estudio de colisiones de alta energía entre protones y antiprotones dejaba escaso sitio para los experimentos de baja energía que se pretendían, y no prevalecieron otros enfoques más desapasionados. Hacia 1984, se estaban despachando a otros laboratorios partes del mencionado anillo de almacenamiento. Con William Kells, del Fermilab, decidí montar un experimento en Ginebra, ya que el LEAR se había convertido en el único laboratorio del mundo capaz de frenar antiprotones hasta las energías del orden de MeV que podía aceptar nuestro aparato de sobremesa. Hartmut Kalinowsky, de la Universidad de Mainz, se sumó al proyecto, igual que Thomas A. Trainor, de la Universidad de Washington.

Los comités de supervisión y los administradores del CERN acogieron nuestra propuesta con cierto escepticismo. Nos proponíamos frenar los antiprotones en la materia, capturarlos en una trampa de iones y enfriarlos por choque con electrones fríos en la misma trampa. (La trampa iónica confina las partículas cargadas, o iones, mediante campos eléctricos y magnéticos.) Abogábamos por técnicas, todavía sin comprobar, que se apartaban bastante de los ensayos habituales de colisión a energías elevadas. Además, uno de nuestros objetivos físicos entraba en competencia directa con un experimento propuesto, un gran espectrómetro de masas en radiofrecuencias en el que el CERN había ya invertido cuantioso tiempo y dinero. Nos preocupaba mucho también la falta de apoyo financiero. La administración norteamericana, por su parte, se mostraba reticente a subvencionar un gran programa nuevo a realizar en el CERN, que no contara todavía con la aprobación doméstica. Para nuestra fortuna, la división de física atómica de la Fundación Nacional para la Ciencia, junto con la Servicio del Ejército del Aire sobre Investigación Científica y la Oficina Nacional de Pesos y Medidas, decidieron patrocinar la propuesta relativa a los antiprotones de baja energía. Algo más tarde, participó el Ministerio de Estado Alemán de Investigación.

En mayo de 1986, el CERN nos concedió 24 horas de acceso a los antiprotones del LEAR a fin de comprobar la posibilidad real de frenarlos desde varios millones hasta pocos miles de electronvolts. Nuestra demostración funcionó; al cabo de dos meses se nos otorgó un segundo período de acceso de 24 horas, en el que nos propusimos mostrar que podíamos capturar los antiprotones frenados.

Pero nos faltó tiempo para procurarnos un equipo moderno con el cual construir una trampa de iones. Con un viejo imán superconductor fabricamos una trampa en un día, mediante juntas herméticas de vidrio a cobre de origen desconocido que encontramos abandonadas entre útiles de cristalero. Enfriamos la trampa hasta los cuatro kelvins mediante el contacto térmico con helio líquido en el interior de un frasco dewar, recipiente con aislamiento al vacío semejante a un termo. Una vez probado el aparato en los EE.UU., lo enviamos por avión al CERN, dada la urgencia y la delicada naturaleza del recipiente que habíamos construido. Sólo cuando el dewar llegó roto a Ginebra nos enteramos de que el envío "aéreo" había errado por Europa en camión.

El aparato quedó reparado unos días antes de la prevista llegada de los antiprotones, que iba a ser a mediodía del viernes 17 de julio. A esto siguió un trabajo informático febril, jalonado por peticiones de "sólo media hora más de BASIC" cuando intentábamos conectar nuestro ordenador con los dispositivos del LEAR con el fin de leer información relativa a las deseadas capturas de antiprotones en el momento de producirse éstas.

El jueves por la noche ocurrió un desastre. Los análisis rutinarios revelaron inesperadamente que ya no podíamos aplicar tensiones elevadas a nuestra trampa de iones sin provocar un arco eléctrico en el fondo de la parte más fría del aparato. Faltaban 12 horas para la llegada de los antiprotones, y el aparato nunca había sido calentado a la temperatura ambiente y luego vuelto a enfriar a cuatro kelvins en pocos días. La mitad de nuestro equipo tiró la toalla y se fue a la cama.

Dada la poca confianza del CERN en la viabilidad de los experimentos propuestos, el fracaso supondría un

Unidades de energía

El electronvolt (eV), energía adquirida por un electrón al atravesar una diferencia de potencial de un volt, es la unidad de energía típica utilizada para describir los electrones ligados en los átomos. A fin de representar las energías grandes y pequeñas que intervienen en los experimentos tratados en este artículo se añaden prefijos métricos normalizados:

1 TeV =	1.000.000.000.000 eV	=	10^{12} eV
1 GeV =	1.000.000.000 eV	=	10^{9} eV
1 MeV =	1.000.000 eV	=	10^{6} eV
1 keV =	1000 eV	=	10^{3} eV
1 meV =	0,001 eV	=	10^{-3} eV

Algunas veces, las energías pequeñas se expresan como temperaturas, en grados sobre el cero absoluto (kelvins, K), siendo 1 meV ~ 12 K. Las grandes energías de GeV y TeV, utilizadas para describir las partículas aceleradas, son todavía muy pequeñas en comparación con la energía cinética ($E = 1/2Mv^2$) de objetos macroscópicos de masa M y velocidad v. Por ejemplo, un clip de un gramo que cae desde un metro llega al suelo con una energía cinética del orden de 10^{17} eV = 10^{5} TeV.

contratiempo importante. Había que intentar la reparación. Cuando abrimos el gélido aparato, el agua que se había condensado en el aislamiento se derramó, pese al aire caliente que insuflaron tres secadores de pelo de potencia industrial. Conseguimos eliminar el arco instalando cables nuevos para alta tensión. Tras recoger mucha agua, secar y limpiar, recompusimos el aparato y empezamos a enfriarlo a las 10 de la mañana del viernes.

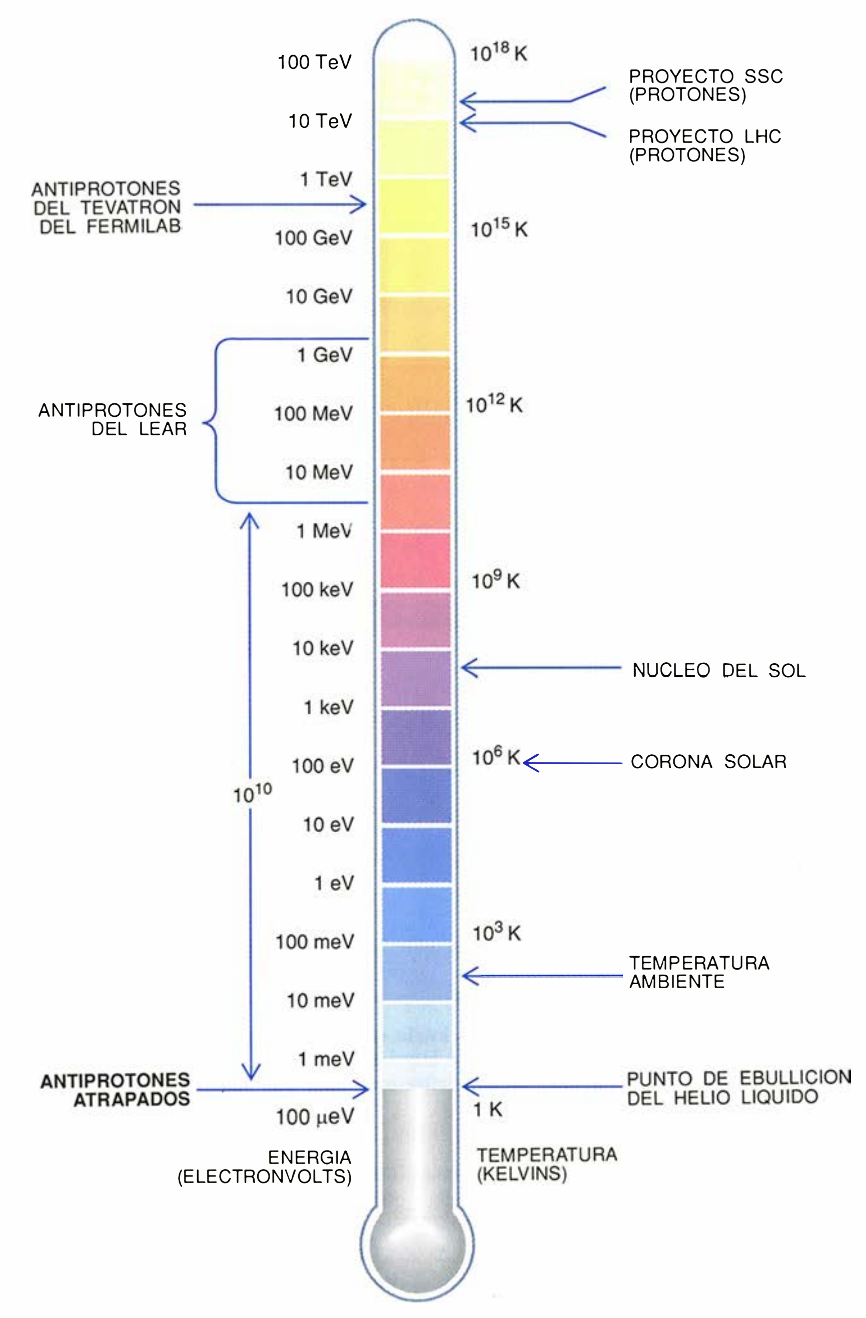
Comunicamos a la sala de control del LEAR que estaríamos preparados para la prueba al filo del mediodía. Qué efímera fue nuestra euforia. Se nos informó que, pese a tener antiprotones disponibles en uno de los grandes anillos de almacenamiento del CERN, había fallado el excitador ("kicker") utilizado para extraer los antiprotones del anillo, y que muy probablemente tendríamos que abandonar el centro sin haber recibido los antiprotones. El experimento parecía sentenciado; el LEAR iba a cerrarse de inmediato por más de un año. Defendí la excepcionalidad de nuestra situación y caí rendido por el sueño.

Me despertaron a las pocas horas: un "mago" de los aceleradores del CERN había logrado hacer funcionar un viejo excitador. No tardó el LEAR en enviarnos breves e intensas ráfagas de antiprotones; duraba cada una 0,2 microsegundos y contenía unos 100 millones de antiprotones. Tras varias horas de ajustar la electrónica de temporización, observamos piones procedentes de la aniquilación de antiprotones que habíamos atrapado brevemente y después liberado.

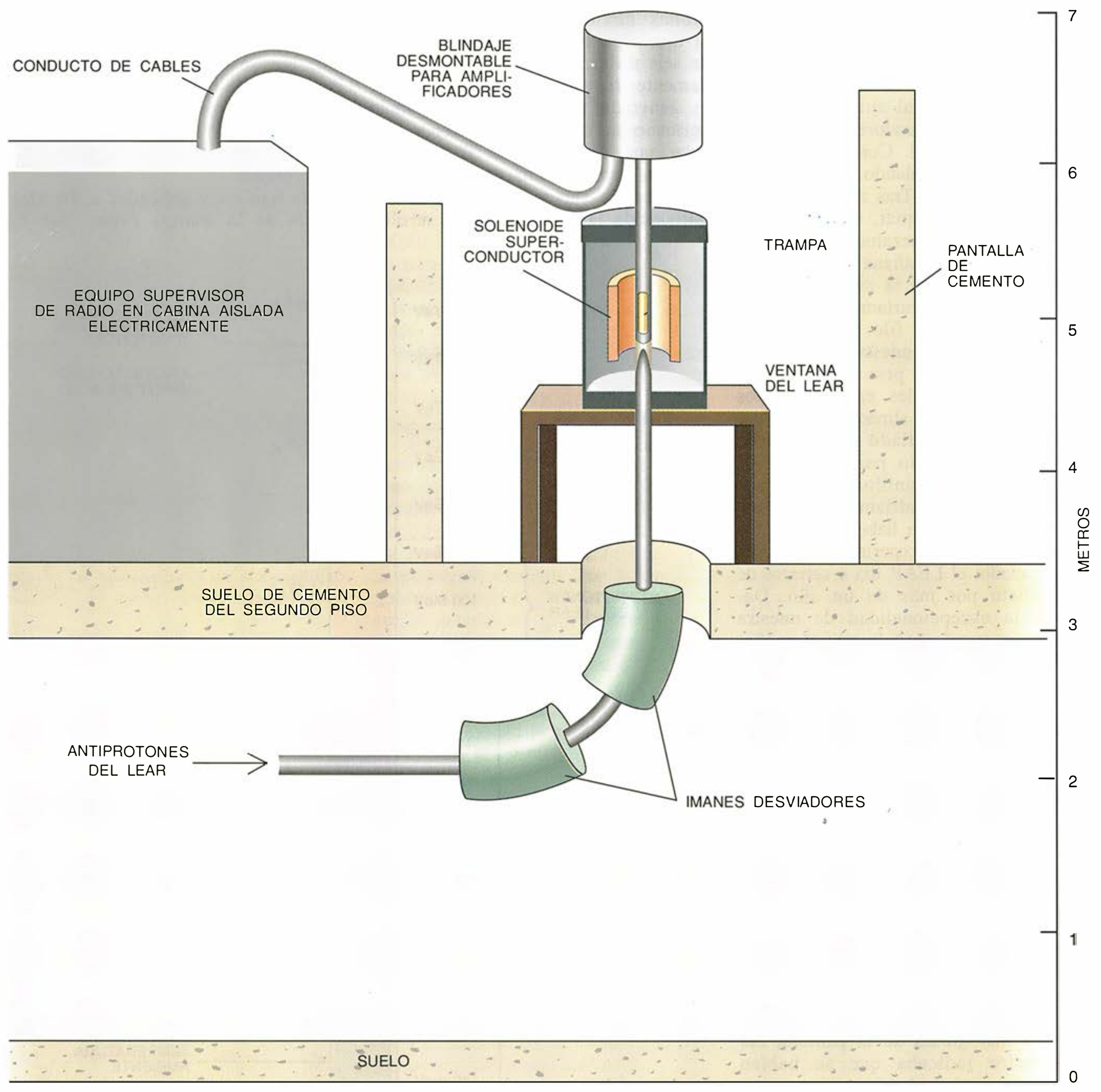
Durante la cuenta atrás se agolpaban en torno a nuestra consola operadores del LEAR y físicos de otros experimentos, aplaudiendo cada vez que el histograma de la pantalla del ordenador indicaba que se habían atrapado y almacenado antiprotones. Unos cuantos antiprotones se retuvieron durante 20 minutos. Quedaba corroborada la viabilidad de los experimentos propuestos.

La ambivalente postura del CERN se transformó en entusiasmo. Se estableció una conexión semipermanente en el LEAR para nuestros experimentos cuando se cerró la máquina durante un año. Nuestro aparato actual, que instalamos en 1988, reposa en una plataforma a 4,3 metros sobre el suelo. En el centro del enfriador de antiprotones se encuentra la trampa de iones, una serie de anillos de cobre dorado apilados y situada dentro de un campo magnético. En el interior de la trampa, las partículas dotadas de carga describen órbitas circulares perpendiculares a la dirección de un campo magnético de seis teslas. Este campo, aproximadamente diez veces más intenso que el generado por un poderoso imán permanente, se produce haciendo circular una corriente de 37 ampères por un arrollamiento de 40 kilómetros de hilo superconductor. Una vez introducida la corriente en el arrollamiento, ésta circula sin resistencia, en movimiento aparentemente perpetuo. No se necesita energía externa. Por medio de bobinas correctoras adicionales se consigue que el campo magnético sea constante en el reducido volumen que han de ocupar los antiprotones.

Las tensiones aplicadas a los electrodos de la trampa evitan que las



2. TERMOMETRO ENERGETICO, en el que se gradúa la vastísima gama de energías a las que se almacenan los antiprotones (y protones) para fines de estudio. Las energías varían en un factor de 10 al pasar de una división a la siguiente. En la parte superior se encuentran el gran colisionador de hadrones ("Large Hadron Collider", LHC) en proyecto para el CERN, y el supercolisionador superconductor (SSC) proyectado para Texas (ambos utilizarán protones); por en medio está el anillo de antiprotones de baja energía ("Low Energy Antiproton Ring", LEAR), del CERN. La nueva frontera de baja energía descrita en el artículo se ubica en el extremo inferior, 10^{10} veces por debajo de las energías del LEAR. Las energías se dan en electronvolts y las temperaturas correspondientes en kelvins (K).



3. VIAJE DE LOS ANTIPROTONES hacia el aparato capturador. Se inicia por el extremo inferior izquierda de la figura, siendo dirigidas las partículas hacia arriba mediante dos imanes desviadores. Los antiprotones salen del vacío del LEAR y entran en el vacío de la trampa de antiprotones a través de un par de ventanas situadas dentro del aparato frío.

partículas cargadas escapen por los extremos superior e inferior del dispositivo. Los electrones están atrapados en una formación pequeña y nebulosa antes de que los antiprotones penetren en la trampa. Las tensiones negativas, de decenas de volts, que se aplican a los electrodos en anillo situados a uno y otro lado de la pequeña zona de atrapamiento, repelen los electrones hacia el centro de la trampa, donde éstos quedan confinados. Dichos electrones irradian rápidamente su energía, en una décima de segundo, y se enfrían a la temperatura (cuatro kelvins) de los electrodos circundantes, dejando preparada la trampa para recibir los antiprotones.

Los antiprotones irrumpen a través del electrodo inferior de la trampa, en un intenso impulso de 6 MeV que procede del LEAR. Inmediatamente empiezan a perder energía en choques aleatorios con las partículas que constituyen el electrodo. Algunos antiprotones se frenan hasta detenerse dentro del electrodo y terminan por aniquilarse. Otros emergen por el eje de la trampa con una energía superior a los 3000 electron-volts (3 keV), inciden en el electrodo superior y también se aniquilan. El resto de antiprotones, de energías inferiores a los 3 keV, son los que podemos capturar. Es posible elevar su número al máximo, hasta valores típicos de uno por cada 5000 antiprotones incidentes, mediante la cuidadosa elección del grosor del electrodo. Los antiprotones filtrados se desplazan en sentido ascendente hasta que, repelidos por la tensión negativa del electrodo superior, giran y retroceden. Para evitar que escapen, se "da un portazo" en la "ventana de

entrada" (electrodo inferior), aplicándole un potencial de –3000 volts en menos de 0,02 microsegundos.

Los antiprotones capturados oscilan, arriba y abajo, a lo largo de los 12 centímetros de la trampa, pasando a través de los fríos electrones atrapados. De la misma manera que una pesada bola de bolera acabaría por detenerse en sus colisiones con ligeras pelotas de ping-pong, los antiprotones se enfrían hasta alcanzar el equilibrio térmico con los electrones atrapados en menos de dos minutos. (Los electrones son ideales para este fin, pues no se pueden aniquilar con los apreciados antiprotones.) En la pequeña trampa se enfrían por lo general los 10.000 antiprotones procedentes de un solo impulso del LEAR. Una vez enfriados los antiprotones, se deja que los electrones escapen al calentarlos, de forma selectiva, mediante ondas radioeléctricas, al par que se reducen temporalmente las tensiones confinadoras de los electrodos de la trampa. No hemos observado pérdidas de antiprotones extremadamente fríos, ni siquiera tras haber guardado las partículas dos meses.

Este prolongado almacenamiento nos ha permitido demostrar que los antiprotones son estables durante 3,4 meses como mínimo. Aunque sea intervalo muy inferior a los 10^{25} años de vida media del protón, nuestra cifra se destaca como el máximo valor de la vida media de un antiprotón obtenido por determinación directa. Ello pudo conseguirse por quedar en la trampa un residuo inferior a 100 átomos de gas por centímetro cúbico, lo que supone una presión límite notablemente baja (5×10^{17} torr), una millonésima parte de la que puede medirse con vacuómetros comerciales. Este alto grado de vacío se logra merced a los átomos de gas residuales, que se adhieren a los fríos electrodos del recipiente herméticamente sellado.

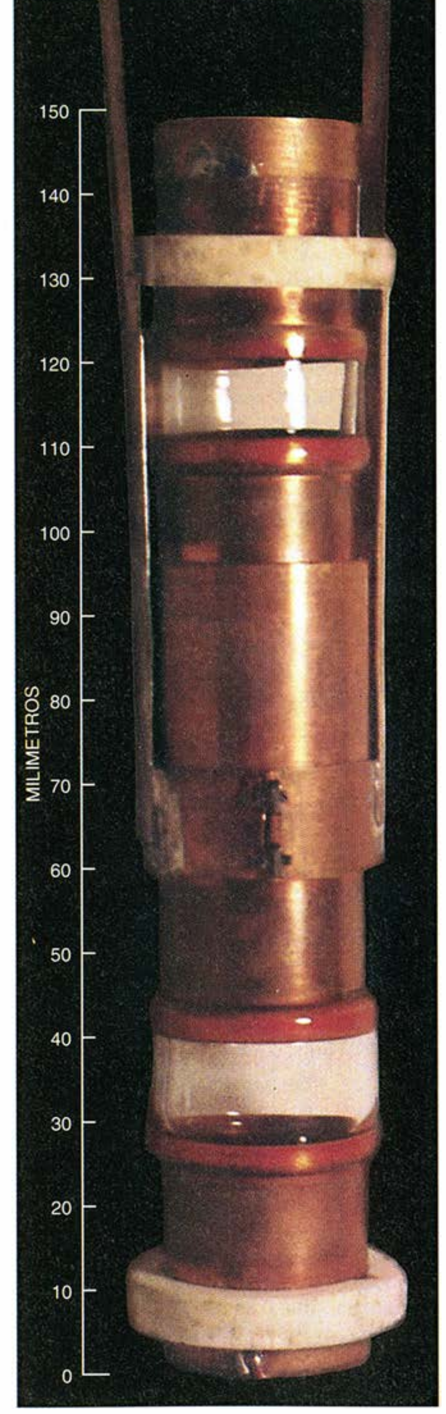
Almacenados con éxito los gélidos antiprotones, pudimos ya medir y comparar la masa de esa partícula con la masa del protón con una precisión 1000 veces mayor que la hasta entonces conseguida. En nuestra labor fuimos ayudados por Xiang Fei, Luis A. Orozco, Steve L. Rolston y Robert L. Tjoelker, de mi grupo de investigación de la Universidad de Harvard, y por Johannes Haas, de la Universidad de Mainz.

Las mediciones se basan en la frecuencia "de ciclotrón" con la que una partícula cargada describe una órbita circular en un campo magnético; dicha frecuencia es el producto de la carga de la partícula por la intensidad del campo magnético, dividido por la masa de la partícula. En otras palabras, una partícula dotada de masa orbita de manera más lenta que una partícula ligera. En el intenso campo magnético que utilizamos, los antiprotones y los protones giran a unos 90 millones de revoluciones por segundo. Detectando la señal radioeléctrica emitida por las partículas en su rápido giro orbital, medimos con un receptor de radio en FM su frecuencia de ciclotrón, que es de 90 millones de ciclos por segundo (90 MHz); comprobamos que las frecuencias orbitales de antiprotones y protones eran idénticas, con una precisión de cuatro partes en 100 millones.

Gran parte del trabajo experimental se dedica a evaluar y reducir las incertidumbres, teniendo en cuenta los efectos del movimiento orbital, algo más complicado, que realmente anima a las partículas dentro de la trampa. Habiéndonos asegurado de que el campo magnético no variaba de una medición a otra, demostramos que el antiprotón y el protón tienen igual relación de carga a masa con la referida precisión de cuatro partes en 100 millones. Si se supone que la cantidad de carga de ambas partículas es idéntica, la masa del antiprotón será la misma que la del protón dentro del mismo límite.

No es tarea fácil mantener constante el campo magnético durante las mediciones, porque los imanes del acelerador de partículas cercano se activan y desactivan cada 2,4 segundos. Pero con mi discípulo Joseph N. Tan descubrí que podíamos diseñar un solenoide o arrollamiento superconductor, capaz de detectar las variaciones del campo magnético externo y de ajustar su propio campo magnético de manera que compense dichas variaciones. El solenoide, que también suministra el intenso campo magnético necesario para nuestras mediciones, reduce las fluctuaciones en un factor de 156. Esta invención, que hemos patentado en vista de sus probables aplicaciones en las técnicas de imagen por resonancia magnética y en la espectroscopía de masas por resonancia de ciclotrón de iones, ejemplifica la relación que existe entre la ciencia pura y la tecnología.

Esperamos, andando el tiempo, medir las frecuencias orbitales del antiprotón y del protón con precisión todavía mayor. Se han ido agregando nuevos colaboradores: Wonho Jhe, David Phillips y Wolfgang Quint, de mi grupo de Harvard, y Julian Gröbner, de la Universidad de Mainz. Nuestros primeros trabajos han sido prometedores: ya hemos aumentado la precisión de las mediciones 40 veces más. Estamos además analizando la posibilidad de medir el momento magnético del antiprotón. Esta partícula se comporta como una barra imantada extremadamente pequeña, cuyo momento magnético es la intensidad efectiva de ese imán.



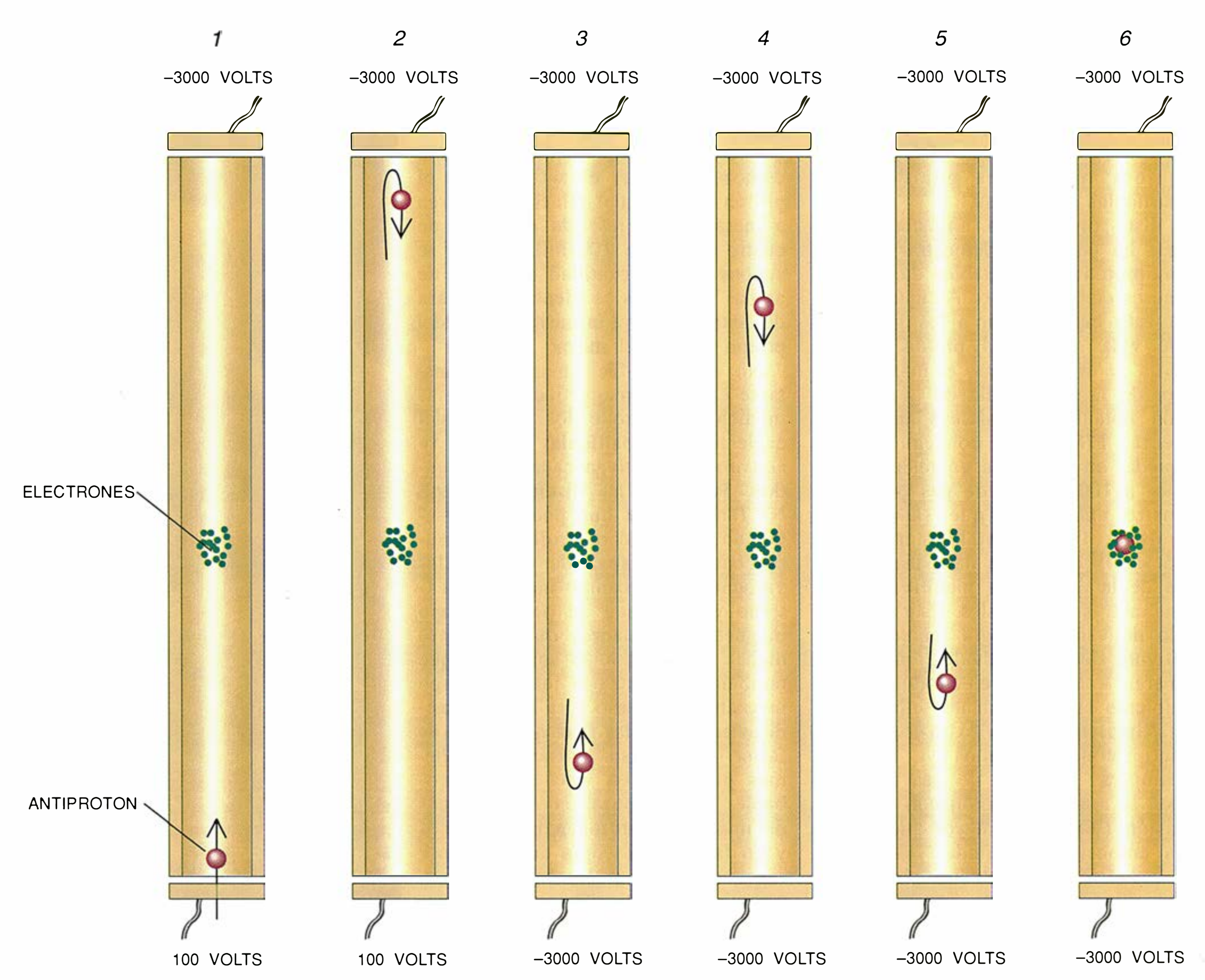
4. TRAMPA DE ANTIPROTONES. Esta primera consistió en unos sencillos electrodos de cobre separados por secciones de cristal.

Las comparaciones entre las frecuencias orbitales en ciclotrón de antiprotones y protones someten a prueba el teorema de invariancia *PCT*. Se empezó por analizar primero la paridad, P. Para entender en qué consiste, imaginémonos un experimento cuyo resultado se contempla en un espejo. Supongamos ahora que se prepara un segundo experimento que sea imagen especular del anterior. Si se conserva la paridad, el resultado de este segundo experimento debe ser idéntico al observado como imagen especular del primero que se realizó.

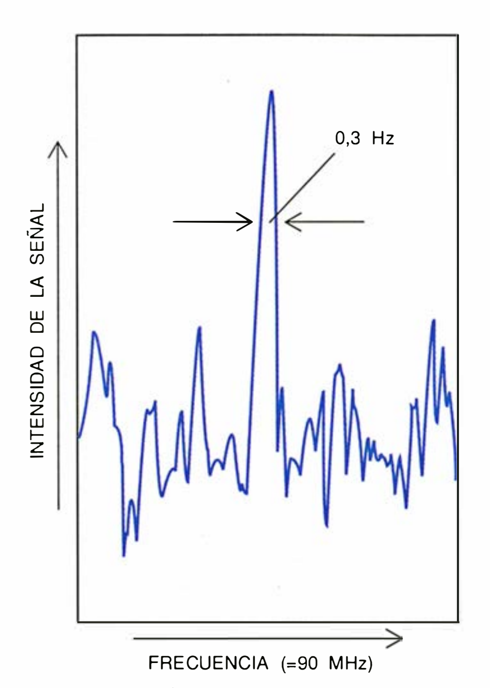
Hasta 1956 se creía que la realidad se mantenía invariante a través de una tal transformación de paridad. A comienzos de aquel año, sin embargo, Tsung-Dao Lee y Chen Ning Yang, entonces en la Universidad de Columbia y en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, respectivamente, advirtieron que faltaba por comprobar que se diera la invariancia de paridad en las interacciones débiles, origen de desintegraciones radiactivas. Más avanzado aquel año, Chien Shiung Wu y sus colegas de Columbia demostraron que los experimentos basados en imágenes especulares no rendían resultados asimismo especulares en presencia de interacciones débiles. Así se desmoronó la fe en la conservación de la paridad.

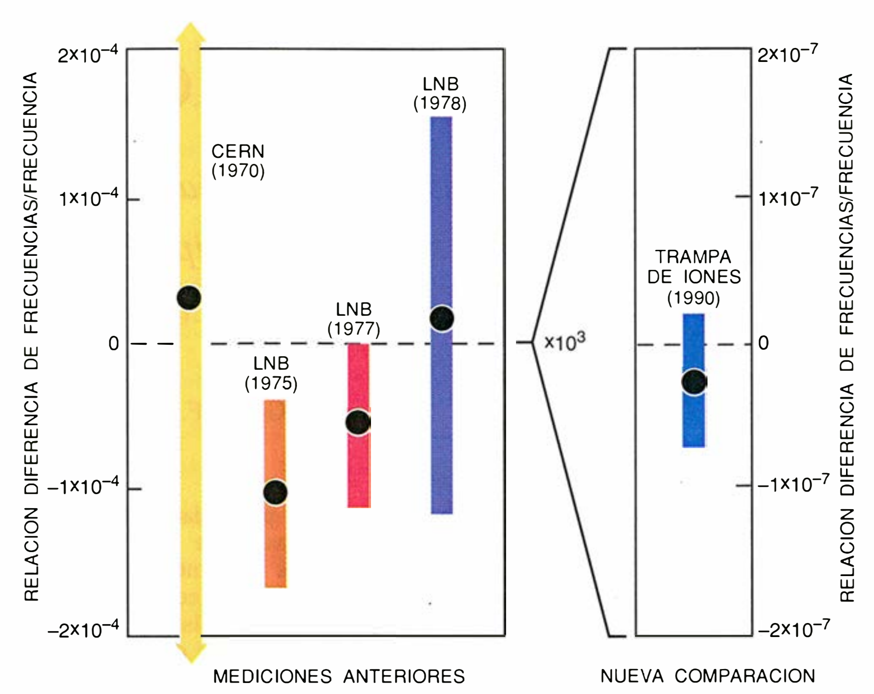
A la pérdida de fe en la vieja creencia sustituyó la fe en una nueva invariancia, *PC*, donde *C* remite a la conjugación de carga, un proceso "imaginario" que convierte las partículas en sus antipartículas correspondientes. Con el fin de comprobar si se conserva *PC*, se construye un experimento especular, y todas las partículas que en él intervienen se sustituyen por sus respectivas antipartículas. En 1964, James Cronin y Val L. Fitch, entonces en la Universidad de Princeton, utilizaron kaones, una clase de partículas, para demostrar explícita e inesperadamente que *PC* no se conserva.

Hoy en día, la mayoría de los físicos creen que *PCT* es invariante (*T* designa la inversión temporal). Hasta ahora no se ha elaborado una teoría razonable en la cual *PCT* no se conserve. Para comprobar la invariancia de *PCT*, imaginemos que se rueda una película de la imagen especular de un experimento en el que todas las partículas se han sustituido por las antipartículas correspondientes.



5. CAPTURA DEL ANTIPROTON. Empieza cuando la partícula (*rojo*) abandona el electrodo de la ventana de entrada en el cual ha sido frenado (*1*) y asciende hasta ser repelido por la tensión de 3000 volts en el electrodo superior (*2*). Invirtiendo su marcha, el antiprotón desciende hacia la ventana de entrada, donde vuelve a ser repelido por haber cambiado entretanto la tensión de esa ventana desde +100 a –3000 volts (*3*). (Inicialmente, la ventana de entrada se mantiene a +100 volts a fin de evitar que entren en la trampa un gran número de electrones liberados por el electrodo al atravesarlo los antiprotones.) El antiprotón queda así atrapado, oscilando arriba y abajo entre las dos tensiones repulsivas. Las repetidas colisiones (*4, 5*) con los electrones (*verde*) de la trampa enfrían el antiprotón hasta que se aloja dentro de la nube de electrones (*6*).





6. RADIOSEÑAL (*izquierda*) que emiten los antiprotones atrapados en su movimiento circular, Dicha señal alcanza un máximo a la frecuencia orbital de ciclotrón. La capacidad de medir la diferencia entre las frecuencias circulares de protones y antiprotones en un campo magnético intenso se multiplica por mil utilizando antiprotones extremadamente fríos (*derecha*). Las anteriores medidas (*centro*) realizadas en el CERN y en Brookhaven (LNB) no alcanzaron dicha precisión.

Un segundo experimento reproduce lo que se ve en la película al pasarla en sentido inverso, es decir, cuando "el tiempo se invierte". De la invariancia *PCT* resulta que la frecuencia de ciclotrón del antiprotón y la del protón en un campo magnético han de ser idénticas. Nuestra comparación somete, pues, a prueba la invariancia *PCT* y establece que las infracciones a la misma son menores que las limitaciones propias del experimento. Se trata, en verdad, de uno de los tests más finos de dicha invariancia. A medida que nuestra precisión aumente, veremos si sigue manteniéndose la invariancia *PCT*.

En un futuro más distante, los antiprotones gélidos deberán posibilitar la producción y el estudio del antihidrógeno, el átomo de antimateria formado por un positrón que rota en torno a un antiprotón. (Los positrones, o antielectrones, se producen de modo natural en la desintegración radiactiva de núcleos atómicos.) En condiciones adecuadas, se debería formar un pequeño número de átomos fríos de antihidrógeno mezclando en grandes cantidades antiprotones con positrones, ambos extremadamente fríos. En 1986 expuse un programa para obtener átomos fríos de antihidrógeno y confinarlos, en virtud de su momento magnético, en una trampa de partículas neutras. Tal vez sea posible también producir y capturar iones de antihidrógeno, cada uno de los cuales consistiría en dos positrones ligados a un antiprotón.

Podrían realizarse varios experimentos importantes con átomos de antimateria atrapados. Las comparaciones de las frecuencias de oscilación internas del antihidrógeno y el hidrógeno pondrían a prueba la invariancia *PCT*, con precisión todavía mayor. Y quizá se logre la medición directa de las propiedades gravitatorias del átomo de antimateria, que, por ser eléctricamente neutro, no acusaría demasiado el efecto de las fuerzas eléctricas ambientales.

La producción de antihidrógeno es empresa ambiciosa y difícil que tardará algún tiempo en realizarse. La tasa de generación estimada no es muy halagüeña. Deben idearse técnicas para enfriar el antihidrógeno hasta las energías sumamente bajas que requiere el atrapamiento, ya que los métodos de enfriamiento al uso implican colisiones con superficies frías que provocarían la aniquilación del antihidrógeno. Queda también por demostrar que puedan efectuarse mediciones espectroscópicas precisas con sólo unos pocos átomos en la trampa. A favor cuenta la circunstancia de que se detecta mejor el antihidrógeno que el hidrógeno. Los piones liberados en la aniquilación registran la presencia de hasta un solo átomo de antihidrógeno.

La producción de antihidrógeno de que hablamos requeriría el mayor número posible de antiprotones fríos. Con tal motivo, hemos demostrado que podemos "apilar" los antiprotones recogidos de sucesivos impulsos del LEAR. En vez de expulsar de la trampa los electrones fríos en cuanto se han almacenado los antiprotones procedentes de un impulso, aquéllos se utilizan para enfriar los antiprotones de muchos impulsos sucesivos. De esta manera, durante una hora se apilan o acumulan más de 100.000 antiprotones fríos en la trampa. Según los cálculos, nuestro aparato actual es capaz de capturar y enfriar hasta un millón de antiprotones. Tendríamos que conseguir trampas mayores y tensiones de atrapamiento más elevadas para capturar y enfriar cantidades todavía superiores de antiprotones.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

COOLING AND SLOWING OF TRAPPED ANTIPROTONS BELOW 100 meV. G. Gabrielse, X. Fei, L. A. Orozco, R. L. Tjoelker, J. Haas, H. Kalinowsky, T. A. Trainor y W. Kells en *Physical Review Letters*, vol. 63, n.º 13, págs. 1360-1363; 25 de septiembre de 1989.

THOUSANDFOLD IMPROVEMENT IN THE MEASURED ANTIPROTON MASS. G. Gabrielse, X. Fei, L. A. Orozco, R. L. Tjoelker, J. Haas, H. Kalinowsky, T. A. Trainor y W. Kells en *Physical Review Letters*, vol. 65, n.º 11, págs. 1317-1320; 10 de septiembre de 1990.

Evolución molecular dirigida

Los bioquímicos han conseguido domeñar la evolución darwinista en el terreno molecular. Con ciclos de selección, multiplicación y mutación, se puede dirigir la evolución de poblaciones de macromoléculas hacia cualquier objetivo funcional

Gerald F. Joyce

Espoleados por las hazañas de la evolución darwinista en la naturaleza, los expertos tratan ahora de reproducir la evolución en el laboratorio. Pero no con organismos o células, sino con macromoléculas, dotadas de propiedades que se ajustan a las exigencias del experimentador.

En cierto modo, la evolución dirigida recuerda los programas de mejora acometidos por horticultores, criadores de gatos y cosas por el estilo. Si uno quiere una rosa más encendida, o un gato siamés más peludo, elige, para iniciar el programa de cruzamientos, a los individuos que mejor responden a las características deseadas. De igual modo, si nos interesan moléculas con unas propiedades químicas concretas, se empieza el experimento con las moléculas que de entrada mejor manifiestan dicha característica. Con las elegidas, el experimentador genera moléculas "hijas" que se parecen, en grado diverso, a sus progenitoras. Este proceso de selección, que no es una mera duplicación fiel, se sigue aplicando hasta que se logra el fin buscado.

El poder de la evolución dirigida reside en la fuerza de los grandes números. El bioquímico está acostumbrado a manejar, a la vez, 10^{13} moléculas diferentes. Una generación de moléculas puede consumir sólo uno o dos días, desde el momento que se seleccionan hasta que se emplean para crear más moléculas. La selección ejercida puede llegar a ser muy rigurosa: basta con que una de cada mil millones de moléculas presente una propiedad útil para que asuma el papel de "reproductora" y engendre la siguiente generación.

El biólogo molecular estudia los genes de un organismo "leyéndolos", como si se tratara de un documento histórico sobre su evolución, con la salvedad de que los genes no están escritos a la manera de los documentos habituales, con tinta y papel: lo que se lee son componentes químicos de una molécula de ADN. En esa línea, el bioquímico examina las moléculas que evolucionan en un experimento y saca la información precisa sobre sus características, en cualquier momento de su historia. Esta información permite orientar los siguientes ensayos. La evolución dirigida habrá de producir nuevos reactivos de interés industrial y drogas de aplicación médica, y es de esperar que, además, ayude al hombre en su esfuerzo por acompasar su marcha con la implacable evolución de la enfermedad.

La evolución darwinista implica fundamentalmente una repetición de tres procesos: selección, multiplicación (amplificación) y mutación. La selección, ya sea natural o artificial, es un proceso de criba que separa los "ricos" de los "pobres". En la naturaleza, los organismos "ricos" son los que sobreviven hasta la madurez sexual, encuentran su pareja y producen descendencia viable. En el laboratorio, los ricos son moléculas útiles, cualquiera que sea el criterio impuesto por el experimentador. Por ejemplo, alguien puede estar interesado en una molécula capaz de unirse fuertemente a cierta toxina. Se seleccionan las moléculas que cumplen dicho requisito y se abandonan las que no lo consiguen.

Multiplicar —o amplificar por decirlo con el barbarismo de moda— es generar descendencia; con mayor precisión, es reproducir copias de los genes heredados. En la naturaleza, selección y multiplicación van acopladas: cuando los organismos eligen sus parejas, la procreación rinde descendencia que porta copias de los genes de sus padres. En el laboratorio, el experimentador debe unir selección y multiplicación, dejando que se propaguen sólo las moléculas que se atienen a los requisitos impuestos. Por mor de exactitud, no se multiplica la molécula escogida, sino lo que ella representa genéticamente.

La mutación introduce variabilidad, sin la cual no cabe el avance evolutivo, pues no habría opciones alternativas sobre las que pudiera actuar la selección. Muchos sistemas de laboratorio introducen variabilidad al comienzo de un experimento de selección para crear una población heterogénea de moléculas. Las más deseables se someten luego a tandas de selección y multiplicación.

En rigor, un proceso de esas características no es evolutivo, ya que no contempla la posibilidad de que aparezcan nuevas mutaciones en cada generación. Pero algunos de los sistemas de laboratorio más depurados sí suministran variabilidad en cada generación; gracias a lo cual, selección, multiplicación y mutación pueden operar constantemente y en concierto.

A finales de los años sesenta se realizó el primer experimento que demostraba la existencia de evolución darwinista en el laboratorio. Sus protagonistas fueron Sol Spiegelman y sus colaboradores, de la Universidad de Illinois, quienes trabajaban con una proteína del fago Qβ, virus que infecta a la bacteria intestinal *Escherichia coli*. La cadena de ARN que constituye el material genético del bacteriófago contiene sólo cuatro genes, uno de los cuales determina la replicasa. Se trata de una enzima que resulta imprescindible para la supervivencia y proliferación del virus, ya que es la encargada de hacer copias del genoma de ARN vírico.

Spiegelman sabía que, si mezclaba

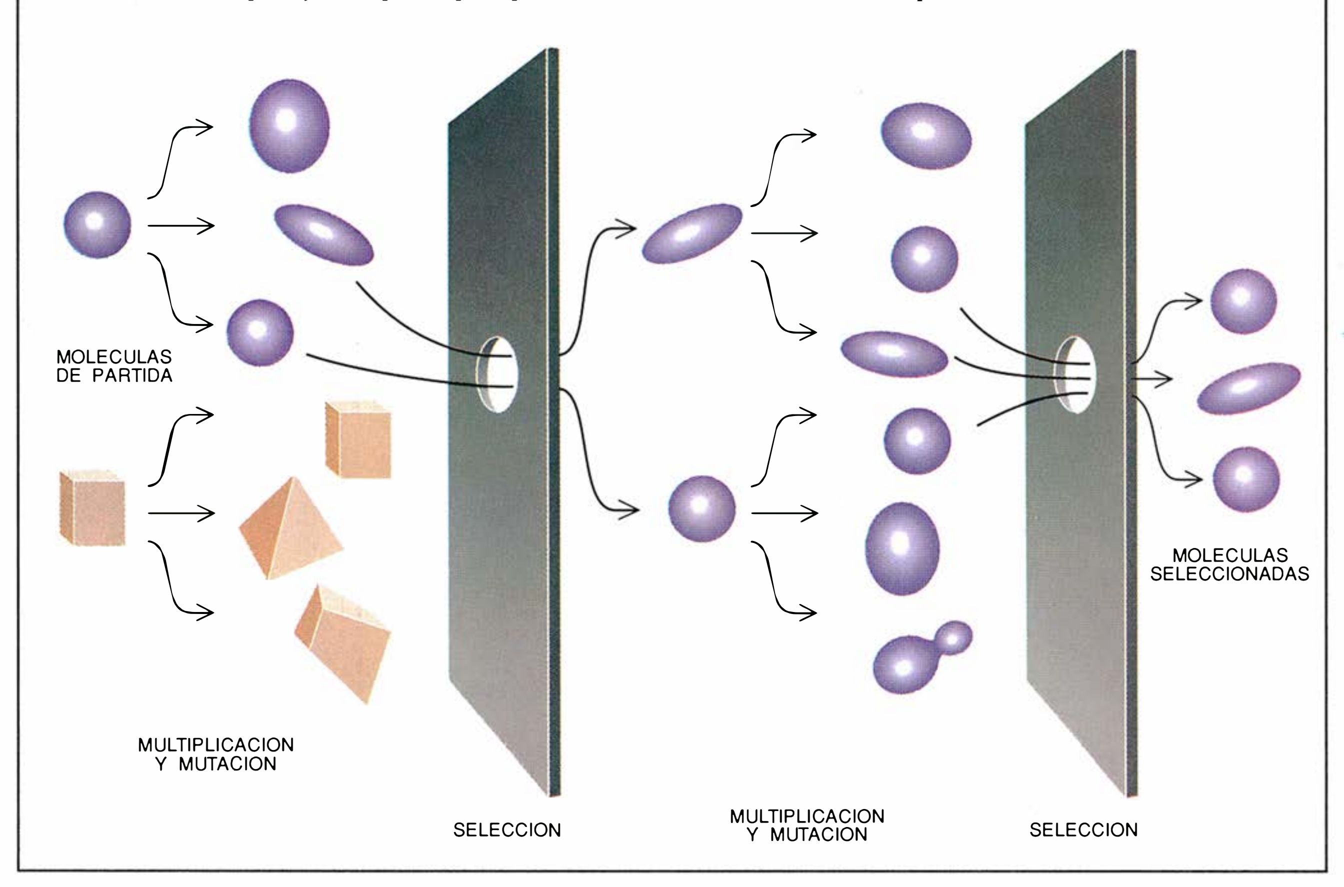
GERALD F. JOYCE es bioquímico experto en ARN y estudioso, desde hace años, de la evolución molecular. En 1984 se doctoró por la Universidad de California en San Diego. Tras un período de formación complementaria en el Instituto Salk de San Diego, marchó, en 1989, al Instituto Scripps, en La Jolla.



1. DIVERSIDAD, fundamental para la evolución. De entre extensas y heterogéneas poblaciones podemos seleccionar los individuos de acuerdo con el criterio que nos importe. Mediante selección, multiplicación y mutación de diversos tipos de macromoléculas, los bioquímicos han comenzado a dirigir la evolución de nuevas drogas y reactivos.

Así funciona la evolución dirigida

En una suerte de "carrera de obstáculos", las macromoléculas compiten para salvar las dificultades funcionales impuestas por el experimentador. Las moléculas seleccionadas se copian y multiplican para producir una nueva generación similar a los progenitores, aunque con algunas mutaciones ya. Las tandas sucesivas de selección y multiplicación con mutación crean una población de moléculas portadora de un carácter deseado.



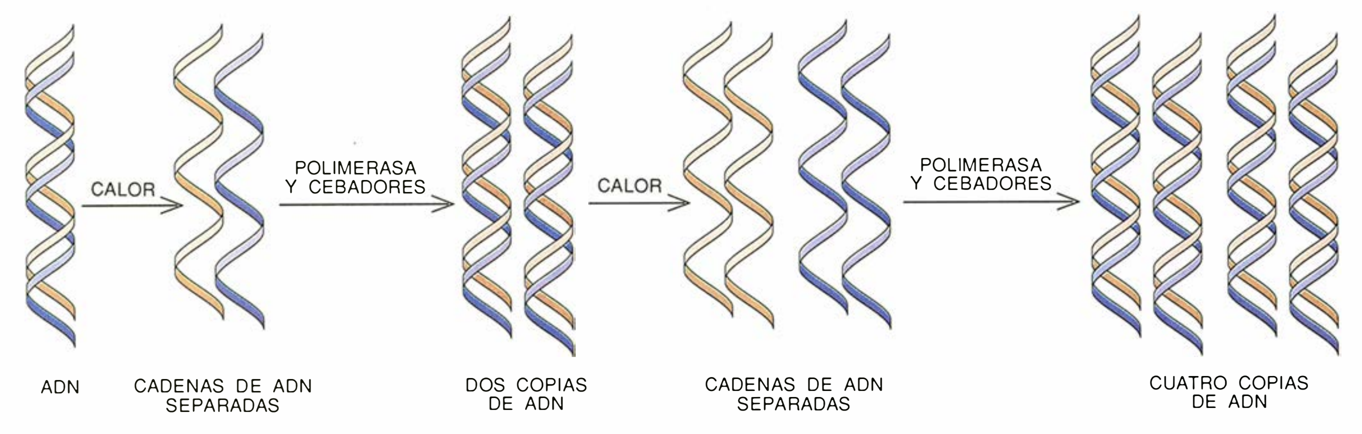
el ARN vírico con su replicasa y añadía ribonucleósidos trifosfatos (las subunidades del ARN), la enzima sintetizaría copias adicionales del ARN vírico. Se conseguía así multiplicar una molécula genética en el tubo de ensayo. El proceso de multiplicación lleva incorporada una fuente de mutación, ya que la replicasa vírica es una proteína algo chapucera: casi siempre introduce uno o dos errores cuando copia una secuencia de ARN. El criterio selectivo elegido por Spiegelman respondía a la siguiente pregunta: ¿qué ocurriría si la única exigencia impuesta a las moléculas de ARN fuese el mandato bíblico *multiplicaos*, con la única condición biológica de que lo hiciesen lo más rápidamente posible?

Reuniendo las características de selección, multiplicación y mutación del sistema Qβ, Spiegelman realizó un experimento de transferencia seriada. Dejó que la replicasa Qβ multiplicase ARN de Qβ en el tubo de ensayo durante 20 minutos. Durante ese tiempo, la enzima produjo copias de las moléculas parentales y de las descendientes, cometiendo algún error que otro. Spiegelman transfirió a continuación una muestra de la mezcla de reacción a otro tubo de ensayo, que contenía replicasa y ribonucleósidos frescos. El ciclo de multiplicación y transferencia se repitió 74 veces. En cada ciclo, el procedimiento favorecía la proliferación de las moléculas que originaban más descendencia antes de cada transferencia.

Periódicamente, Spiegelman apretaba el tornillo de la selección, reduciendo el intervalo disponible para la multiplicación. Las moléculas que necesitasen más tiempo para copiarse dejarían menos descendencia que las otras. A medida que la evolución avanzaba en el tubo de ensayo, los ARN supervivientes eran cada vez más cortos, ya que las moléculas breves podían copiarse con mayor rapidez, y por tanto con mayor frecuencia que el genoma vírico entero. En la transferencia número 74, las moléculas de ARN que seguían evolucionando habían eliminado el 83 % del genoma original de Qβ, reteniendo sólo la parte que la replicasa necesitaba para llevar a cabo su trabajo. Aunque tales moléculas eran ya incapaces de infectar a *E. coli*, habían conseguido alcanzar con bastante éxito lo que Spiegelman les pedía: habían multiplicado por 15 su tasa de replicación.

El sistema Qβ ha contribuido significativamente al conocimiento de la evolución molecular darwinista. Desde los trabajos de Spiegelman, varios investigadores han utilizado el sistema Qβ para producir moléculas de ARN de interés. Así, mediante evolución dirigida, Leslie E. Orgel y colaboradores, del Instituto Salk en San Diego, han creado variantes del ARN de Qβ resistentes a bromuro de etidio, droga inhibidora de la replicación del ARN *in vitro*.

El sistema Qβ tiene, sin embargo, una limitación seria: la replicasa no copia cualquier secuencia de ARN. De hecho, la principal exigencia del sistema Qβ, mayor que la que pueda introducir el experimentador, es que



2. REACCION EN CADENA DE LA POLIMERASA, técnica utilizada para hacer copias de moléculas específicas de ADN. Se calienta la doble hélice de ADN al objeto de separar sus cadenas. La enzima (junto con las subunidades que conforman el ADN y unas breves secuencias cebadoras) fabrica nuevas copias de la hélice original. El proceso se repite *ad infinitum*.

las moléculas de ARN que se generen sean un sustrato adecuado para la replicasa.

La elección de la replicasa Qβ restringe la versatilidad del sistema y, por tanto, su utilidad. Pero acaban de desarrollarse sistemas evolutivos de laboratorio que mantienen separados los procesos de replicación y selección, y ello contribuye a que sean más flexibles. Esta separación la hizo posible el advenimiento de los procesos de multiplicación que, a diferencia de la replicasa Qβ, son independientes de la secuencia del gen.

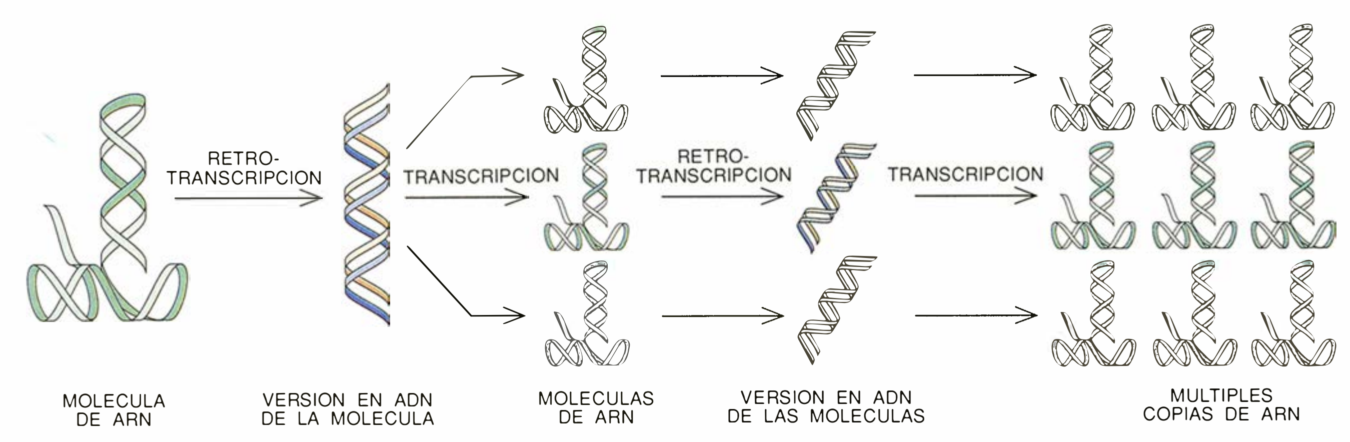
Uno de esos procedimientos es la reacción en cadena de la polimerasa, que permite multiplicar una secuencia de ADN hasta un millón de veces en pocas horas. Las polimerasas son enzimas que ensamblan nucleótidos para formar cadenas nuevas de ADN o ARN cuya secuencia es complementaria a la de otra cadena, que actúa de molde (la replicasa Qβ es una suerte de polimerasa). La reacción en cadena de la polimerasa se fundamenta en la capacidad que las cadenas de ADN sintetizadas por la polimerasa poseen para servir, a su vez, de molde en nuevas tandas de replicación.

La polimerasa copia las dos cadenas de una hélice bicatenaria de ADN, que puede contener un gen, y produce una molécula bicatenaria más. A continuación, copia las dos moléculas existentes, la nueva y la vieja, y produce una tercera y una cuarta. Las cuatro se doblan en ocho copias, y así sucesivamente. El número de hélices crece geométricamente. En pocas horas, el gen original se ha copiado millones de veces.

Con una técnica similar se pueden copiar moléculas de ARN. Se utilizan en este caso dos tipos de polimerasas, una que copia el ARN en ADN (fabrica una cadena de ADN complementaria a la del ARN) y otra que vuelve a copiar el ADN en ARN. El resultado final es el mismo que en la reacción en cadena de la polimerasa: copia tras copia, se consigue una cantidad inmensa de genes de ARN idénticos. Este procedimiento permite obtener millones de copias en una hora. Si se precisa un mayor poder replicativo, se pueden combinar las dos técnicas, la de multiplicar ARN y la de la reacción en cadena de la polimerasa, y así obtener miles de millones de copias de un gen.

Se da la paradoja de que la reacción en cadena de la polimerasa y la técnica de multiplicación de ARN pecan de fidelidad excesiva. Vale decir que, a diferencia del sistema de Qβ, donde los errores de multiplicación son frecuentísimos, las dos nuevas técnicas no fallan el número de veces suficiente para satisfacer el requerimiento de mutación de un sistema de evolución dirigida. Para nuestra fortuna, se han ideado versiones de ambos procedimientos que permiten mutaciones con una frecuencia razonable y controlada. Con estos poderosos procedimientos de multiplicación en la mano, los bioquímicos pueden ahora aplicar libremente una amplia gama de imposiciones selectivas.

ADN y ARN constituyen los objetivos idóneos para esos experimentos, ya que las secuencias de bases que determinan sus propiedades físi-

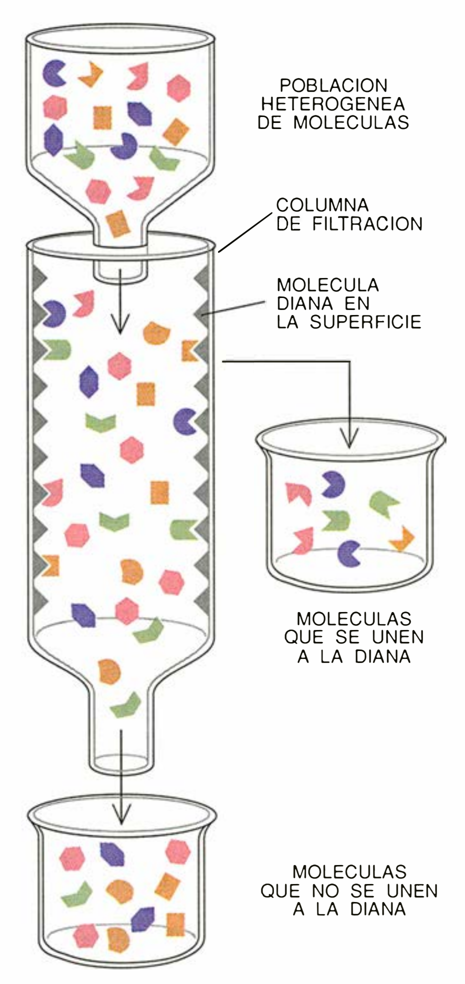


3. MULTIPLICACION DE ARN, técnica para fabricar copias, utilizada cuando las moléculas empleadas pertenecen a un ácido nucleico. La retrotranscriptasa empieza por fabricar una copia en ADN de una molécula de ARN. A partir del ADN, la transcriptasa sintetiza muchas copias del ARN original. Este proceso se repite automáticamente a temperatura constante.

cas y químicas son indicativas de su composición genética. Pueden seleccionarse en razón de su función, y, luego, multiplicarlas mediante copia de la secuencia genética responsable de dicho rol.

Es lógico ver, en las proteínas, las macromoléculas funcionales por excelencia. A fin de cuentas, la naturaleza las utiliza como agentes catalíticos en las células. Ahora bien, de acuerdo con lo establecido por Thomas R. Cech, de la Universidad de Colorado, y Sidney Altman, de la Universidad de Yale, el ARN también puede ser un catalizador. Entra, pues, dentro de lo razonable pensar que el ADN pueda serlo. El ADN y el ARN realizan más actividades químicas vitales; por ejemplo, la de establecer uniones con otras moléculas.

Los bioquímicos, en particular los consagrados a la investigación médica, muestran especial interés en emplear ADN y ARN como agentes químicos aplicados. Los ataques cardíacos se tratan, en situaciones de urgencia, con la droga estreptoquinasa, una proteína bacteriana que disuelve coágulos sanguíneos. A veces, sin embargo, se presenta una reacción alérgica a la droga, algo nada extraño cuando se inyectan proteínas foráneas. Con los cuidados adecuados, el paciente puede sobrevivir a las dos cosas, el ataque al corazón y la reacción alérgica, pero si en el futuro sufre otro ataque, las opciones de tratamiento son más limitadas. Es posible que algún día la solución esté en el uso de drogas anticoagulantes basadas en moléculas de ADN y ARN, especialmente diseñadas para que no provoquen hipersensibilidad a la estreptoquinasa.



4. CRIBA DE MOLECULAS en una columna de filtración. En esta técnica de selección, las moléculas que tienen afinidad por la diana se pegan a la superficie y pueden recogerse posteriormente.

La industria biotecnológica se apoya en la evolución dirigida para convertir en realidad esa clase de drogas. John J. Toole y sus colegas, de Gilead Sciences, se han empeñado en la síntesis de un inhibidor de la trombina, proteína que forma coágulos. En vez de buscar la solución en la naturaleza, comenzaron a rastrear moléculas de ADN con propiedades útiles. Construyeron 10^{13} moléculas de ADN unicatenarias, con secuencias diferentes, y mezclaron esa población de moléculas con la trombina, que previamente habían inmovilizado en una superficie sólida. (Para evitar adherencias molestas o inespecíficas, el grupo de Toole empleó moléculas que en experimentos anteriores habían demostrado su falta de afinidad por el soporte sólido.)

La mayoría de las moléculas de ADN no lograron unirse a la trombina. Sólo un 0,01 por ciento, aproximadamente 10^9 moléculas, lo alcanzaron. Tras recoger esa fracción, el equipo de Toole acudió a la reacción en cadena de la polimerasa para crear una población de 10^{13} moléculas, descendientes de la fracción inicialmente seleccionada. El grupo repitió por cinco veces el proceso de multiplicación selectiva. Acabó por dominar la población de moléculas capaces de unirse a la trombina y, por ende, de impedir la coagulación. Se está ensayando el comportamiento de esas moléculas en monos y primates, donde ya han demostrado su eficacia anticoagulante.

La trombina no es una proteína que se engarce en el ácido nucleico, por más que se descubriera cierta secuencia de ADN capaz de unirse ávidamente a la trombina. Aunque no entraba esa secuencia en las predicciones, salió a la luz tras repetidas tandas de multiplicación selectiva.

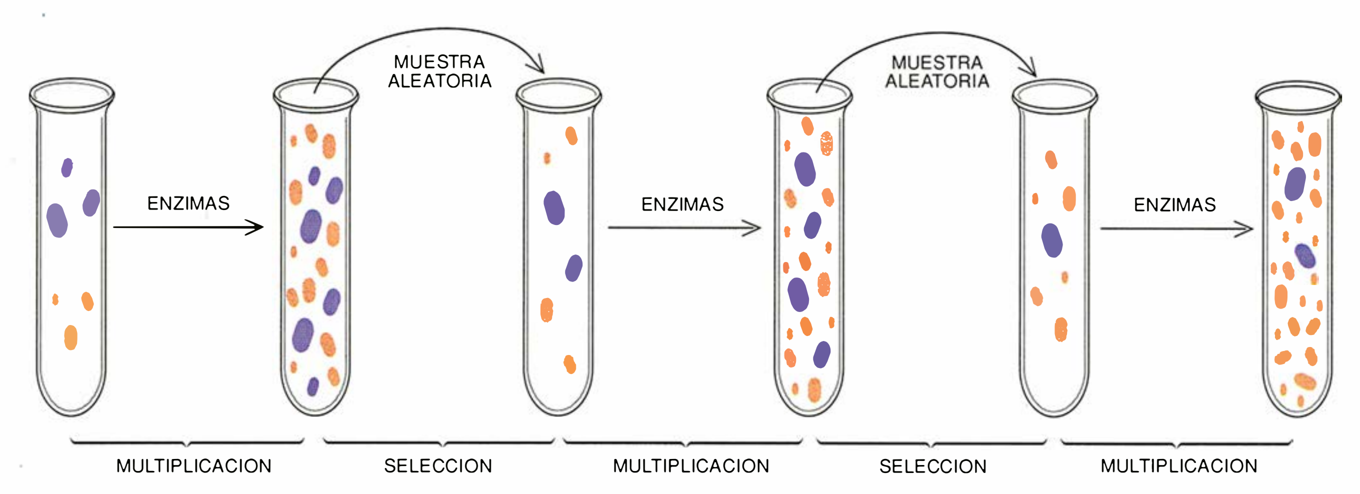
Se han analizado ya grandes poblaciones de ADN y ARN, y se han buscado moléculas capaces de unirse a dianas de distinta naturaleza. Los primeros resultados positivos solían estar protagonizados por moléculas de probada capacidad de unirse a los ácidos nucleicos, como proteínas reguladoras que se unen a secuencias específicas de ARN dentro de las células. Tradicionalmente, para estudiar cómo se establecen las interacciones entre ARN y proteínas, los bioquímicos provocan mutaciones dirigidas en el ARN, y a continuación comprueban su efecto en la interacción. Se reconstruye así poco a poco el entramado de interacciones en el mecanismo de unión ARN–proteínas, como si de un juego molecular se tratase.

La tendencia actual es provocar 10^{13} mutaciones a la vez, y dejar que opere la multiplicación selectiva. (Se pueden crear, y a veces se hace, poblaciones iniciales mayores, pero el costo de sintetizar más de 10^{15} moléculas resulta prohibitivo.) Parte o toda la secuencia de ARN se hace aleatoria, esto es, se cambian al azar algunas de las subunidades originales de las moléculas de ARN elegidas. A continuación, el experimentador criba esa población heterogénea de ARN en busca de las que mejor se unan a la proteína diana. El proceso de criba se asemeja al seguido por Toole en su inquisición de una molécula con afinidad por la trombina, esto es, pasando la población por proteínas unidas a una superficie sólida.

Durante la multiplicación, las moléculas seleccionadas se retrotranscriben en secuencias de ADN, que pueden multiplicarse muchas veces con la reacción en cadena de la polimerasa. Por último, las moléculas de ADN se transcriben en ARN. Cabe también copiar directamente los ARN seleccionados, mediante la técnica de multiplicación del ARN.

La diana del ADN o ARN puede ser cualquier tipo de molécula, no sólo una proteína. Entre los primeros experimentos de multiplicación selectiva a los que sonrió el éxito hemos de citar el realizado en 1990 por Andrew D. Ellington y Jack W. Szostak, de la Facultad de Medicina de Harvard, utilizando pequeños colorantes orgánicos como diana. Analizaron 10^{13} secuencias aleatorias de ARN y encontraron algunas moléculas que se unían muy específicamente a los colorantes empleados.

Acaban de repetir el ensayo con moléculas de ADN de secuencias aleatorias. ¿Qué han conseguido? Un puñado enteramente distinto de moléculas capacitadas para unirse a los colorantes. Al transcribir las secuen-



5. MOLECULAS PROLIFICAS, seleccionadas en un experimento de transferencia seriada. Las moléculas se mezclan con las enzimas y se les da un tiempo para que se repliquen. Se extrae una muestra pequeña y se transfiere a un tubo de ensayo fresco, para repetir el proceso. Como el tiempo que una molécula necesita para replicarse depende de su tamaño, las menores (*naranja*) se multiplican mejor que las mayores (*azul*). Las moléculas pequeñas se adueñan del sistema.

cias de ADN seleccionadas en moléculas de ARN, han comprobado que aquéllas no se unen a los colorantes, de lo cual se infiere que las moléculas de ADN y ARN se unen al colorante a través de mecanismos dispares.

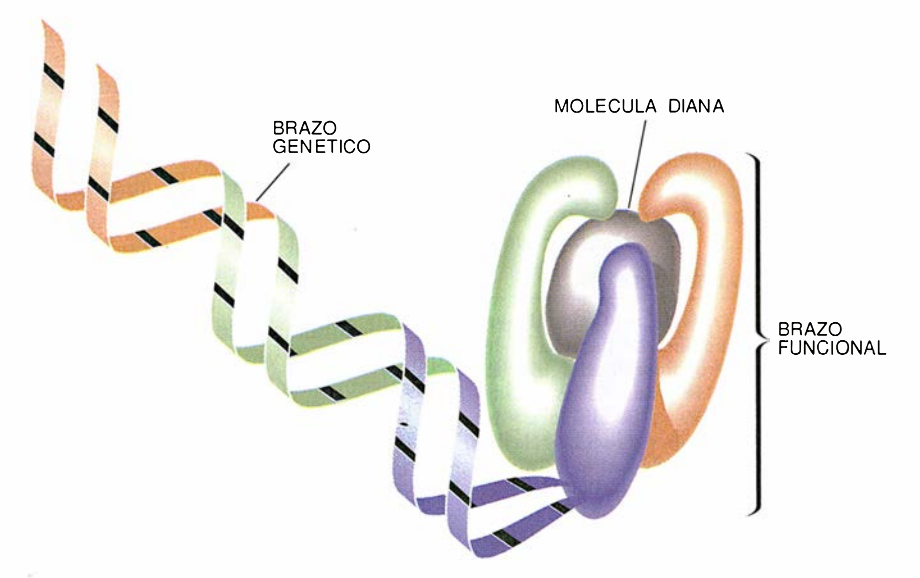
Esta observación revela una importante verdad sobre la evolución dirigida (y de hecho, sobre la evolución en general): las formas seleccionadas no son necesariamente la mejor de las soluciones posibles a un problema. Sólo son la mejor solución dentro de la historia evolutiva de una macromolécula particular.

No hay que limitar los experimentos de evolución dirigida al ADN o al ARN. En principio, cualquier población de macromoléculas puede ser objeto de selección, si se dispone de un medio sencillo de multiplicar los rasgos genéticos distintivos ("descripciones genéticas") de los individuos escogidos de dicha población. Basados en esas ideas, Sydney Brenner y Richard A. Lerner, del Instituto Scripps en La Jolla, han inventado un lenguaje propio de descripción genética, susceptible de ser aplicado a cualquier tipo de macromoléculas.

De acuerdo con Brenner y Lerner, se preparan moléculas bifuncionales con dos "brazos", unidos por un punto común. Un brazo es una macromolécula funcional; se valora en atención a su capacidad para enlazarse en una diana; el brazo puede estar formado por aminoácidos, azúcares u otros compuestos orgánicos. El brazo segundo, una macromolécula genética (ADN, por lo común), cifra la descripción del brazo funcional. La secuencia de nucleótidos del brazo genético es en realidad un registro del listado de subunidades que integran el brazo funcional.

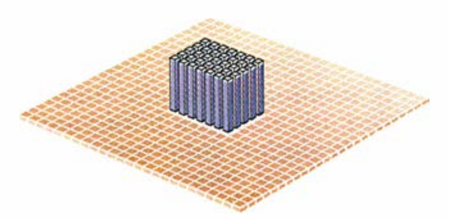
Los dos brazos se sintetizan en paralelo. Se añade, primero una subunidad al brazo funcional y a continuación una cierta combinación de nucleótidos al brazo genético. Terminada la formación de ambos brazos, se comprueba si la molécula es capaz de unirse a alguna diana. El experimentador puede recuperar la molécula que tiene esa capacidad y multiplicar sus brazos genéticos aplicando la reacción en cadena de la polimerasa. El análisis de las secuencias de los ADN multiplicados revela la composición del brazo funcional de la molécula seleccionada.

Este sistema de multiplicación selectiva ilustra la naturaleza simbólica de la información genética. Antes de fabricar las moléculas bifuncionales, se ha de elegir o componer un código genético de nucleótidos que describa las subunidades del brazo funcional. Brenner y Lerner utilizaron tres nucleótidos para representar cada subunidad funcional, a imagen de la naturaleza que emplea un código de tripletes de nucleótidos para especificar los aminoácidos. Se puede utilizar, no obstante, cuatro o más símbolos genéticos para cifrar cada subunidad funcional. Cuanto mayor sea el número de subunidades distintas del brazo funcional, más símbolos genéticos se necesitarán para crear un vocabulario cuya magnitud suficiente permita describir cada subunidad con un símbolo exclusivo.

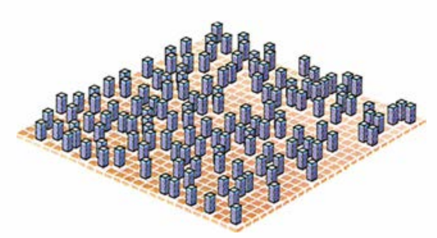


6. A LAS MOLECULAS CON DOS BRAZOS como éstas les aguarda un gran futuro en los experimentos de evolución dirigida. El brazo funcional, compuesto de aminoácidos u otro tipo de subunidades, puede adaptarse a cualquier función; por ejemplo, unirse a cierta diana. El brazo genético, hecho de ADN o ARN, contiene una descripción cifrada de la composición del brazo funcional.

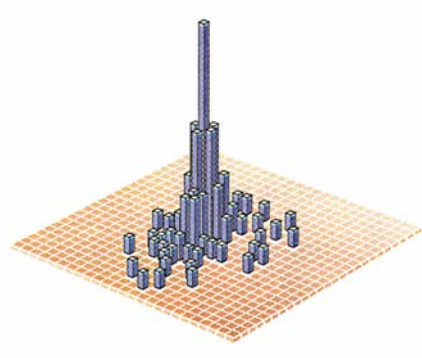
Con independencia del tipo de macromoléculas que se elija para un experimento de evolución dirigida, hay que empezar por crear una población molecular heterogénea. Contamos con tres estrategias básicas. La primera consiste en preparar todas las posibles secuencias de una determinada longitud. Si la macromolécula posee 15 subunidades, y tenemos cuatro tipos distintos de subunidades, el número de posibles combinaciones será cuatro elevado a 15, esto es, más de mil millones. Si la población inicial fuese de 10^{13} moléculas, habría unas 10.000 copias de cada secuencia. Ciertos métodos de multiplicación selectiva, así los que operan con moléculas bifuncionales como el de Brenner y Lerner, requieren que la población inicial se construya de acuerdo con esta estrategia omnicomprensiva, que abarque todas las secuencias posibles.



ESTRATEGIA GLOBAL



ESTRATEGIA DE PERDIGONADA



ESTRATEGIA DIRIGIDA

7. TIPOS de estrategia mutacional para diseñar las poblaciones de partida en los experimentos de evolución dirigida. La rejilla representa la gama de posibilidades macromoleculares; la altura de los bloques indica la concentración relativa de una de las posibilidades en la población. En la estrategia global se incluyen todas las posibles variaciones con límites definidos; pero si éstos aparecen más difusos, la estrategia de "perdigonada" asegura la representación de una muestra aleatoria de las posibilidades. La estrategia dirigida emplea mutaciones para crear una molécula que se parezca a otra que ofrece las propiedades buscadas.

Ahora bien, conforme se elonga la macromolécula, aumenta exponencialmente el número de posibles variantes de la misma, por cuya razón no nos es permitido en muchos ensayos fabricar o estudiar todas las variantes. Es preferible entonces una estrategia de "perdigonada" para construir la población inicial. Se trata, en esencia, de obtener un número elevado de macromoléculas aleatorias, aunque no incluya todas las combinaciones posibles de subunidades.

En el caso de Toole, de la interacción ADN-trombina, se trabajó con moléculas en las que la aleatoriedad afectaba a 60 posiciones. Una población que cubriese todas las posibilidades hubiese necesitado 4^{60} (aproximadamente 10^{36}) moléculas distintas, lo que trasciende con mucho las posibilidades de síntesis y análisis. La población de 10^{13} moléculas con la que Toole comenzó contenía una pequeña proporción de todas las posibilidades; a pesar de lo cual el éxito del experimento demostró que se trataba de una muestra suficiente para un ensayo de evolución dirigida. Cuando se buscan moléculas con propiedades nuevas es razonable adoptar una estrategia de "perdigonada".

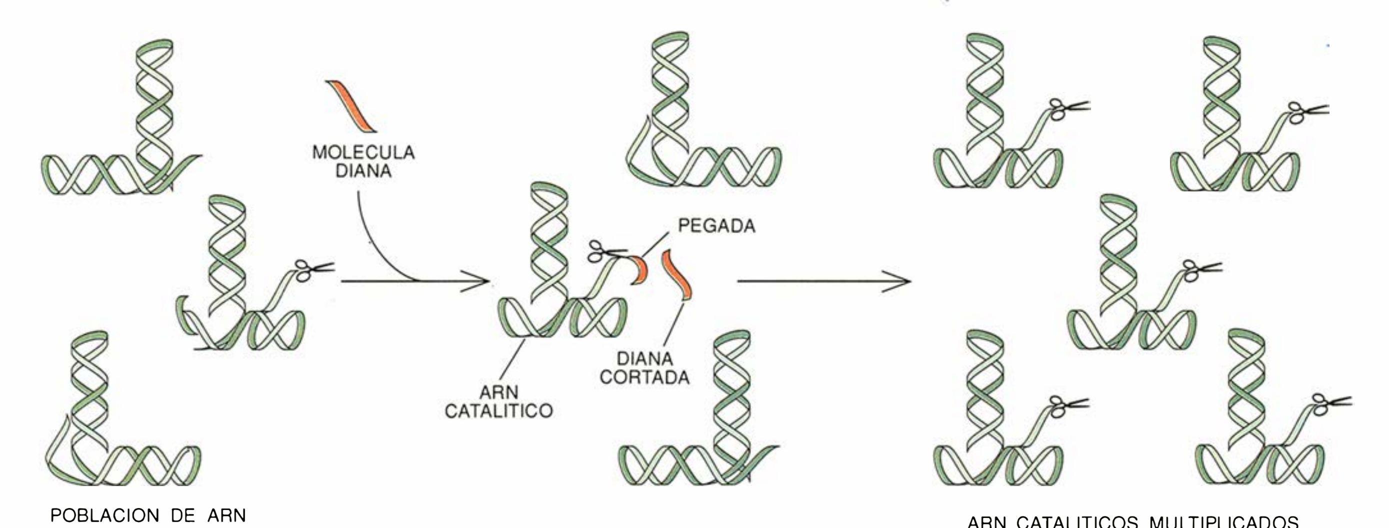
Vayamos con la tercera estrategia, más directa. Se aplica en la producción de una población inicial en los casos en que la macromolécula deseada quizá sea variante de alguna ya conocida. Se parte de moléculas con secuencias "maestras", en las que se introducen algunas mutaciones, para mejorarlas o adaptarlas a las nuevas necesidades. Se selecciona una frecuencia de mutación que asegure que todas las moléculas presentes en la población diferirán, en algún rasgo, de la secuencia maestra. Algunas moléculas se distinguirán más que otras; eso es obvio. La población resultante abunda en secuencias muy parecidas a la "maestra" y posee cantidades decrecientes de las que son cada vez menos parecidas.

La evolución darwinista de los organismos en la naturaleza emplea la tercera estrategia. La naturaleza introduce variaciones en las secuencias génicas parentales, que a su vez son el resultado de procesos previos de selección y multiplicación. Como en cada generación se produce aleatoriedad, la heterogeneidad siempre se mantiene en la población. La reiteración en este proceso de introducción de aleatoriedad encierra un gran potencial, ya que consigue que los mutantes seleccionados originen a su vez más mutantes, algunos de los cuales pueden ser aún más ventajosos que sus predecesores. Por el contrario, la estrategia de la perdigonada única es útil para encontrar nuevas opciones, pero no para dirigirlas hacia un fin deseado.

Merece la pena destacar un aspecto sutil pero importante de la evolución darwiniana y del poder del proceso de aleatoriedad reiterativa. Como las nuevas mutaciones aumentan la variación ya existente, la búsqueda evolutiva está sesgada —algunos observadores dicen que incluso dirigida— por hechos selectivos que han ocurrido con anterioridad. La evolución no es previsora. Los genes que están presentes en la población en un momento dado reflejan las propiedades que fueron ventajosas en generaciones precedentes. Además, el número de copias de una secuencia genética determinada es proporcional a la ventaja selectiva que confiere. En una familia grande de secuencias parecidas, las secuencias más ventajosas y abundantes producirán el mayor número de descendientes. Los mutantes nuevos se generan preferentemente, por lo tanto, en las ramas del árbol familiar que ha demostrado una especial capacidad para producir mutantes ventajosos. Una estrategia de aleatoriedad reiterativa constituye, pues, la clave del poder de la evolución darwinista *in vitro*. Y contamos con todas las piezas necesarias, no sólo para empezar a rastrear, en poblaciones extensas de moléculas de ADN y ARN, su capacidad de realizar funciones de interés, sino también para acelerar la evolución de las moléculas y sacar el máximo partido a sus características funcionales.

En mi laboratorio se aplica la evolución darwinista a las moléculas de ARN. Trabajamos, sobre todo, con ribozimas, moléculas de ARN dotadas de propiedades catalíticas. Se conocen muy pocas ribozimas naturales, y con un repertorio de funciones muy limitado. Sin embargo, allí donde la naturaleza no lo ha hecho, nosotros podemos introducir elementos nuevos, mediante un procedimiento acelerado de evolución *in vitro* que dirija las ribozimas hacia nuevos comportamientos catalíticos.

En uno de esos estudios empezamos con una ribozima natural, obtenida del protozoo *Tetrahymena thermophila* y capaz de cortar y empalmar ciertas moléculas de ARN. Nos proponíamos desarrollar una ribozima



8. ARN QUE CORTA ADN seleccionado en experimentos realizados por el autor. Una población heterogénea de moléculas de ARN, dotadas de propiedades diversas y desconocidas, se mezcla con un ADN diana. Las moléculas que podían cortar la molécula diana lo hicieron. Durante el proceso, un fragmento de ADN se le queda pegado, lo que le permitió al autor multiplicar preferentemente ese ARN. Si el proceso se repite, al final se crea una población de ARN muy diestro en cortar ADN.

que realizara lo propio con una molécula de ADN, y asignarle así una misión terapéutica: degradar el ADN de un virus que hubiese infectado una célula.

Empezamos con una población de 10^{13} variantes de la ribozima de *Tetrahymena.* Expusimos luego la población a un sustrato de ADN. Sólo unas pocas moléculas de ARN lograron cortar el sustrato, y además quedaron unidas al producto degradado. Multiplicamos de forma selectiva las moléculas en cuestión y se introdujeron nuevas mutaciones durante el proceso de multiplicación, para producir una segunda generación de moléculas con capacidad para cortar ADN mayor que la de la población original. El ciclo completo se repitió 10 veces, y el resultado final fue una nueva población de ARN muy diestra en cortar ADN.

La evolución darwinista *in vitro* es un proceso que depende literalmente de nuestra mano. Las generaciones que pasan no tienen por qué extinguirse, pueden guardarse en el congelador y recuperarse en cualquier momento con sólo descongelarlas. Poderosas técnicas, derivadas de la tecnología del ADN recombinante, permiten aislar moléculas individuales de cualquier generación, determinar su secuencia genética completa y medir con precisión sus propiedades catalíticas. Es posible reconstruir con detalle el curso de la evolución molecular. Se puede incluso retroceder hasta cualquier punto de la historia y empezar de nuevo, utilizando el mismo criterio selectivo u otro nuevo. El juego darwinista de la selección, multiplicación y mutación iterada se ha convertido en recreo de moda.

La técnica de la evolución dirigida está en su infancia. Hay que trabajar más para aumentar el tamaño de las poblaciones moleculares que pueden manipularse, incrementar el rigor de los esquemas selectivos y acortar el tiempo requerido para crear cada generación. La evolución darwinista —esto es, multiplicación selectiva acoplada a una estrategia de aleatoriedad reiterativa— se limita todavía a poblaciones moleculares de ADN y ARN. Pero ya se divisan en el horizonte sistemas capaces de dirigir la evolución de proteínas y otros tipos de macromoléculas.

Merced a la evolución dirigida, los bioquímicos pueden habérselas con la naturaleza blandiendo sus mismas armas. Las nuevas macromoléculas, evolucionadas *in vitro*, pueden unirse específicamente a las macromoléculas que evolucionen en la naturaleza. Conforme van cambiando las macromoléculas naturales, el investigador, auxiliado por la evolución dirigida, acompasará su ritmo de creación, un punto que podría ser crucial a la hora de anular la evolución natural de la resistencia a drogas en virus y otros patógenos.

A modo de ejemplo: mediante la evolución dirigida, el bioquímico podría desarrollar un ARN capaz de unirse a una proteína vírica y bloquear la infección por el virus. Las proteínas víricas podrían mutar a formas de resistencia y tornar inútil la droga de ARN. A su vez, la evolución dirigida podría generar nuevas formas de ARN contra las formas mutadas.

En el desarrollo de nuevos catalizadores tiene la evolución dirigida un prometedor campo de aplicación. Los bioquímicos trabajan ya en el "diseño racional de enzimas". Manipulan catalizadores biológicos a fin de alterar sus propiedades estructurales y funcionales. Ahora bien, si se dispone de una población de moléculas heterogénea, de tamaño suficiente, y se cuenta con una estrategia de multiplicación selectiva, ¿por qué no dejar que las moléculas evolucionen ellas mismas? Esta nueva posibilidad situaría a los bioquímicos en el papel de espectador mientras se representa lo que Brenner con ironía ha denominado el "diseño irracional de enzimas".

Queda por ver qué funciones catalíticas se podrán manejar con la evolución dirigida. Los increíbles logros de la evolución darwinista en la naturaleza deberían ser un estímulo, pero no olvidemos que la naturaleza nos lleva cuatro mil millones de años de ventaja. Y entre tales funciones destaca el interés que encierra la propia autorreplicación de la molécula; cualquiera dotada de tal propiedad podría evolucionar de forma ininterrumpida.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SELECTION OF SINGLE-STRANDED DNA MOLECULES THAT BIND AND INHIBIT HUMAN THROMBIN. Louis C. Bock, Linda C. Griffin, John A. Latham, Eric Vermaas y John J. Toole en *Nature*, vol. 355, n.º 6360, págs. 564-566; 1992.

IN VITRO GENETICS. Jack W. Szostak en *Trends in Biochemical Sciences*, vol. 17, n.º 3, págs. 89-93; marzo de 1992.

DIRECTED EVOLUTION OF AN RNA ENZYME. Amber A. Beaudry y Gerald F. Joyce en *Science*, vol. 257, págs. 635-641; 31 de julio de 1992.

Perfiles

John Horgan

NOAM CHOMSKY: *un radical libre*

Noam Chomsky se ha sentido molesto. Sólo he comentado que me parece curiosa su acerba crítica contra el poder y la autoridad, siendo así que en lingüística la autoridad es *él*.

"De ninguna manera", replica. Su voz —calmada y de una suavidad convincente, incluso cuando embiste contra alguien— se endurece de repente. "En el ámbito de la lingüística, mi postura es minoritaria, y siempre lo ha sido."

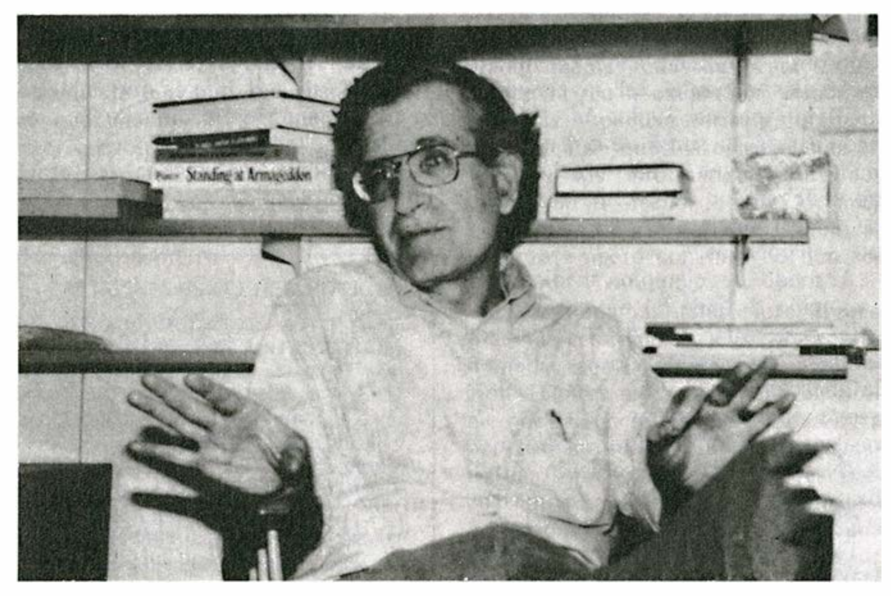
Puede que lo discuta, pero sus teorías sobre el lenguaje —que él considera que brota de una facultad humana innata— han dominado la lingüística durante más de 30 años. "No hay uno solo de los grandes temas de la lingüística actual que se aborde en términos diferentes de los que Chomsky escogió para definirlo", se lee en la *Encyclopaedia Britannica.*

Acaricia otras inclinaciones. Una, la crítica social; en ese ámbito posee fama de iconoclasta impenitente. Le gusta llamar a los Estados Unidos "superpotencia terrorista" y a los medios de comunicación "agentes de propaganda". Le repele el capitalismo, pero también le desagradaba la Unión Soviética, y declara que "la Revolución Bolchevique destruyó el socialismo".

Espíritu de contradicción donde los haya, su talante se resume en el lema "cualquiera que sea el sistema establecido, me tendréis contra él". Está absolutamente contra todo, incluso contra sí mismo. "No soy un lingüista profesional", dice. "Me considero un negado para los idiomas, y me aburre su estudio." Insiste en que el Instituto de Tecnología de Massachusetts le ha proporcionado empleo durante 35 años por la única razón de que a ese centro le dejan sin cuidado las humanidades. El semblante de Chomsky no se perturba cuando dice cosas así, pero trasluce una sutil autocomplacencia.

Pasé un día con él en Cambridge. Ha cumplido 65 años, es bastante flaco y muestra la chepa incipiente del lector y escritor empedernido. Usa gafas de montura metálica y viste con libérrimo desenfado. Por las facciones de su cara y el pelo largo y canoso podríamos confundirle con un alumno universitario, eso sí, alguien más familiarizado con Kant que ducho en jaranas.

Durante mi visita vi cómo, allí en Harvard, denunciaba que los sindicatos se preocupan más de mantener su poder que de representar a los trabajadores. ¿Su auditorio? Cuadros sindicales, no podía ser otra cosa. "No me entusiasma ir repartiendo buenas notas a la gente por lo bien que lo hace", me explica.



NOAM CHOMSKY piensa que el lenguaje brota de una facultad humana innata.

Las inclinaciones intelectuales de Chomsky se despertaron pronto. Nació en Philadelphia en 1928 y fue educado como "judío ateo practicante", dice, para añadir, "no es tan contradictorio como pueda parecer". A la edad de 10 años escribió su primer artículo político —una diatriba contra la sublevación militar en España— para la revista de su colegio. Uno o dos más tarde se puso a estudiar gramática hebrea medieval con su padre, experto en dicha lengua. Todavía adolescente comenzó a dar clases en un colegio hebreo.

A finales de los 40, Chomsky cayó bajo la influencia de Zelling S. Harris, un lingüista de la Universidad de Pennsylvania. Por aquel entonces, la lingüística —y de hecho todas las ciencias sociales— estaban dominadas por el conductismo, que sostiene que la ciencia debe considerar sólo lo que puede ser observado y que los estados mentales quedan fuera de su ámbito.

Los conductistas hacían hincapié en la noción —expuesta por el filósofo británico John Locke en el siglo XVII— de que la mente comienza "en blanco". Se va llenando con lo que le aporta la experiencia. No habría predilecciones innatas, sino que deberían ser las circunstancias las que conformaran la estructura del lenguaje, lo que explicaría el carácter arbitrario que en buena medida tiene. Armados con ese enfoque, los lingüistas se dedicaron más a catalogar la fauna y flora de las lenguas humanas en su exuberante variedad que a buscar principios comunes subyacentes.

Empujado por Harris, que también se salía de los cánones habituales, Chomsky se enfrentó a la interpretación conductista. A la manera de las mediciones tomadas por un físico cuya lectura sólo tiene sentido en cuanto que ilumina la estructura de la materia, razonaba, el lenguaje interesa sólo en lo que puede revelarnos de la estructura de la mente.

Abogaba por trasladar el tema central de la lingüística desde los epifenómenos del lenguaje hacia una cuestión epistemológica: ¿Qué es lo que conoce la mente cuando conoce un lenguaje, y cómo lo conoce?

Para adentrarse en el problema, empezó por delinear un sistema de reglas que generasen sentencias gramaticales. Otros lingüistas, Harris entre ellos, habían ideado algunos de tales sistemas, pero Chomsky los tomó de la matemática y la lógica para crear una gramática generativa, así se denomina, más rigurosa y comprehensiva que la de sus predecesores.

Trabajando con esta herramienta, Chomsky demostró que el lenguaje revestía una complejidad mucho mayor de lo imaginado, hasta el punto de que nadie puede aprenderlo en su plenitud. Aprestémonos, por ejemplo, a transformar la frase "El hombre está aquí" en una pregunta de sí o no; bastará con proceder a leves cambios: "¿Está aquí el hombre?" Pretendamos, sin embargo, transformar en pregunta la frase un poco más compleja "El hombre que está enfermo está aquí". Cabría esperar que el niño que acaba de aprender a hacer preguntas fáciles construiría la pregunta de la siguiente manera: "¿Está el hombre que enfermo está aquí?" Pero los niños nunca cometen esos errores, según Chomsky. Siempre se fijan en el verbo *principal* de la frase, no en el primero.

Señala que esta regla es bastante sutil; resulta difícil expresarla en términos lingüísticos formales o en un programa de ordenador. Pero los niños la aplican sin que nadie se lo haya enseñado explícitamente.

Este ejemplo y muchos otros del mismo estilo, mantiene Chomsky, muestran que no aprendemos todas las reglas de la gramática sólo mediante inducción, por prueba y error, como creían los conductistas; algunos principios fundamentales del lenguaje deben estar ya inseridos en nuestra mente. No debiera, agrega, aplicarse siquiera la palabra "aprender" al lenguaje igual que la aplicamos a propósito de la conducción del coche. Le gusta asimilar la capacidad de conversar a los cambios fisiológicos que sobrevienen con la pubertad; con una mínima intervención del ambiente, los humanos adquieren ambas como parte del crecimiento.

Las teorías de Chomsky, presentadas en *Syntactic Structures* en 1957, provocó la deserción en masa del conductismo hacia el campo del cognitivismo —según el cual los estados mentales son lo importante—, tendencia que persiste todavía. No han faltado contraataques. Quizás el más sonado tuvo lugar en los setenta, cuando un grupo de la Universidad de Columbia enseñó a un chimpancé —llamado Nim Chimpsky— a comunicarse mediante un lenguaje de símbolos. Los investigadores sostenían que su trabajo apoyaba el modelo conductista frente al de Chomsky. Este, partidario de que el lenguaje es un rasgo único de los humanos, rechaza tal reto. Decir que los monos pueden adquirir un lenguaje porque aprenden algunos signos sencillos, argumenta, es como decir que el hombre puede volar porque puede saltar.

Las ideas de Chomsky siguen evolucionando. Hace unos 10 años, se dio en la lingüística un "gran avance del paradigma". Con otros, propuso que la facultad innata para el lenguaje se parecía al conjunto de interruptores que presenta una red eléctrica. Todos los humanos nacen esencialmente con la misma red, pero los interruptores conectan diferentes posiciones —lo que corresponde a diferentes reglas gramaticales— según el niño aprenda swahili, chino o inglés. A los lingüistas compete buscar más allá de estas reglas superficiales, o ajustes, de la red subyacente, en la cual se halla la "estructura profunda" del lenguaje.

"Decir que los monos pueden adquirir un lenguaje porque aprenden algunos signos sencillos es como decir que el hombre puede volar porque puede saltar"

A la vez que revolucionaba el campo de la lingüística, avivaba su compromiso político. Fue uno de los intelectuales norteamericanos que se opusieron a la guerra de Vietnam, y se convirtió en héroe de la izquierda cuando se le acusó de incitar a los jóvenes a rebelarse contra el alistamiento. (Los alegatos no se denunciaron ante los tribunales.)

Pero desde que terminó la guerra de Vietnam, Chomsky se ha hecho enemigos a diestro y siniestro. En 1979 firmó una demanda defendiendo el derecho a la libertad de expresión de Robert Faurisson, un historiador francés para quien los libros sobre el holocausto judío pecaban de exageración. Este incidente, sumado a sus críticas contra el estado de Israel y su apoyo a la causa de los palestinos, le ha valido la enemistad de muchos colegas.

Chomsky sostiene que la prensa estadounidense está al servicio de los intereses estatales más que de la verdad, lo que provoca a los periodistas en lo que más les duele. Se muestra duro con los "progresistas" del *New York Times*, a quienes acusa de ser críticos de boquilla, mientras que a la hora de la verdad apoyan la situación en todos sus términos salvo en algunas trivialidades.

Eso explica el silencio al que se le somete en los periódicos, por no hablar de la televisión. No se va a torcer por ello. "Si empezaran a reseñar mis libros en el *New York Times*" —dice— "mi primera pregunta sería: ¿En qué me estoy equivocando?"

Pero no le faltan otros canales para propagar sus ideas. Da dos clases de lingüística a la semana en el MIT y dedica unas 20 horas aproximadamente a consultas de los estudiantes. Escribe gran cantidad de cartas (más de 2000 el año pasado, según su secretaria, algunas de 15 páginas a un espacio) y dicta conferencias y seminarios a lo largo y ancho del mundo. Y, por supuesto, la gente puede comprar sus libros (más de 25 según el último recuento, básicamente sobre lingüística y política).

Chomsky puede ser poderosamente persuasivo. Al final del encuentro que presencié en Harvard, los líderes sindicales movían la cabeza en señal de asentimiento —incluso cuando les acusaba de venderse a las ganancias. Pero Chomsky dice que su propósito no es el de convertir a la gente a su partido, sino el de hacerles pensar.

Ciencia y sociedad

La formación profesional en Europa

Valor en alza

Alternativa más o menos querida a la educación secundaria académica, e inefable Cenicienta del sistema educativo, la formación profesional es objeto de un creciente interés, que obedece a las nuevas exigencias del mercado laboral, a la difícil situación económica y a los elevados índices de desempleo, tanto juvenil como general. En todos los países de Europa Occidental se procura impartir a todos los jóvenes, al término de su escolaridad obligatoria, al menos un año de enseñanza y formación profesionales, que puede consolidarse luego mediante formación en el empleo. En los Países Bajos, de 1975 a 1985 se elevó en un 80 por ciento el número de jóvenes que obtuvieron un diploma técnico. En Francia se ha introducido un bachillerato profesional, que ofrece a los alumnos un ciclo profesional completo, de nivel igual al de la educación general.

Las formas que asumen la educación y la formación profesionales reflejan en general las tradiciones del sistema educativo del país. Así, en Francia, donde la educación pública tiene gran arraigo, la respuesta prevalente tiende a ser una educación de larga duración e impartida esencialmente en la escuela. Al decir de Ingemar Fägerling, director del Instituto de Educación Internacional de la Universidad de Estocolmo, la tendencia de Europa Occidental a dar carácter profesional a los niveles superiores de la educación secundaria es opuesta a la que se observa en Estados Unidos y Japón, donde los *community colleges* y las mismas empresas privadas están ganando terreno como centros de formación profesional.

La enseñanza y la formación profesionales han de ser flexibles y adaptables, para satisfacer las exigencias cambiantes del mercado de trabajo en materia de especialización, lo que las orienta hacia rasgos como los siguientes:

– "transferibilidad": las aptitudes impartidas no estarán ligadas exclusivamente a una profesión específica, sino que podrán utilizarse en diversas ramas de actividad.

– énfasis en la comunicación, tanto para facilitar el desarrollo del trabajo en equipo como por la importancia del flujo de información a través de la empresa.

– experiencia profesional: las aptitudes, actitudes y conductas necesarias sólo se adquieren en el lugar de trabajo; muchas grandes empresas han identificado un tipo de mentalidad y de conducta especiales, que pueden contar tanto como las calificaciones profesionales puramente teóricas a la hora de conseguir un empleo.

En lo que respecta al currículo, llegar a conclusiones de validez general requeriría un análisis pormenorizado de cada una de las especialidades, ramas y ocupaciones. Pero, si hubiera de destacarse una, sería la tendencia a fomentar los contenidos de educación general en aquellos niveles o ciclos de la formación profesional que se solapan de algún modo con la enseñanza obligatoria. Es fácil comprender que así sea puesto que, a medida que se va ampliando el período de obligatoriedad escolar, se va posponiendo también la edad a la que es posible iniciar algún tipo de formación profesional. Y es precisamente esta presión en favor de más educación durante más tiempo la que obliga a mantener en el currículo de los ciclos inferiores de la formación profesional, especialmente en aquellos inmediatamente posteriores al fin del período obligatorio, una presencia más o menos importante de contenidos relacionados con la educación general y, más específicamente, con el ámbito de las materias instrumentales (lenguaje, matemáticas, idioma moderno), lo cual, por otra parte, ha de facilitar ulteriormente el trasvase de alumnos procedentes del sistema de formación profesional al sistema de educación general.

En segundo lugar, se observa también una progresiva tendencia a agrupar las innumerables especialidades con las que cuenta el sistema de formación profesional de cada país en torno a unos ejes comunes o familias de profesiones. Se configura así como un continuo que permite adquirir distintas y sucesivas cualificaciones mediante estructuras modulares, con independencia del nivel inicial de formación, lo que facilita la flexibilidad y la transferencia de lo aprendido y, por consiguiente, el reciclaje profesional. De este modo, la formación profesional se enfoca desde sectores de ocupación genéricos, cuyas destrezas y conocimientos generales proporciona inicialmente, para ir dando luego entrada paulatina a otros más específicos, directamente vinculados ya con el perfil de la profesión que el alumno o aprendiz desee llegar a ejercer.

Un catálogo de los grandes grupos comunes a todo el territorio europeo habría de incluir, en primer lugar, el de la gestión comercial, administración, contabilidad y economía de empresas y, en segundo término, la agricultura, que en algunos casos se completa con ganadería, horticultura e, incluso, mecánica agrícola, industrias forestales o agronomía. Les siguen, en el sector secundario, el ámbito de la mecánica, la electricidad y la electrónica, la química y la metalurgia (en algunos casos, englobados total o parcialmente bajo el epígrafe de industria); el dominio de la construcción; los campos que hacen referencia a las artes aplicadas y artes gráficas; y, de nuevo en el sector servicios, los sociales y los paramédicos.

Sorprende la situación de la informática, ámbito en el que las autoridades responsables de la formación profesional no parecen haberse preocupado en exceso de proporcionar enseñanzas a nivel básico o de técnicos medios. Otro tanto ocurre en los casos del sector textil y del vestido, de la marina mercante y de la pesca, de la hostelería y la restauración, o, finalmente, de los auxiliares de laboratorio, pero esto resulta más comprensible teniendo en cuenta que se trata de sectores cuya relevancia varía mucho de unas naciones a otras. Esta íntima relación entre el sistema productivo y el de formación profesional se hace aún más patente en ámbitos de gran especialización como sucede, por ejemplo, con la orfebrería en Portugal, el transporte terrestre en Dinamarca, o las humanidades musicales y los idiomas en Bélgica.

En algunos países, hay momentos, ciclos o niveles del sistema de formación profesional en los que se prescinde de la flexibilidad y se opta por un grado muy elevado de espe-

cialización, en aras de la eficacia a corto plazo y de garantizar la obtención de un empleo cuanto antes. Así sucede, por ejemplo, con las escuelas técnicas y profesionales en Grecia o con los primeros niveles de cualificación profesional en Francia, donde existen 260 especialidades del CAP y unas 69 del BEP (fundamentalmente en el sector servicios) sin agrupar por familias o campos profesionales y con un iter formativo muy específico. En ambos casos, y aun en otros como el del Reino Unido, donde estas actuaciones se llevan a cabo desde el sector no formal, debe tomarse esta tendencia hacia una formación especializada de corta duración como una exigencia derivada de las elevadas tasas de desempleo juvenil, que obliga a un enfoque puramente ocupacional.

Además de promover la formación profesional, muchos países de Europa han aumentado las oportunidades de formación en calidad de aprendiz o combinando estudio y trabajo. Es probable que la alternancia de períodos de escolaridad y períodos de trabajo en una empresa se convierta en la vía normal de ingreso en el mercado laboral. Las instituciones educativas y las empresas cooperarán de forma cada vez más estrecha para satisfacer al mismo tiempo las necesidades de estas últimas y de los estudiantes. (Francesc Pedró, profesor de educación comparada en la Universidad Nacional de Educación a Distancia.)

Sexta extinción

Pero, ¿ocurrió?

En la historia de la vida se registran episodios de sacudida general de la biosfera, con resultado de extinción de buena parte de las especies, en un lapso de escasos millones de años, una nimiedad en la vastedad del tiempo geológico. Hasta cinco acontecimientos de ésos se han producido en los últimos 500 millones de años, reconocen los paleontólogos. El más reciente supuso el relevo de los dinosaurios, hace unos 65 millones de años.

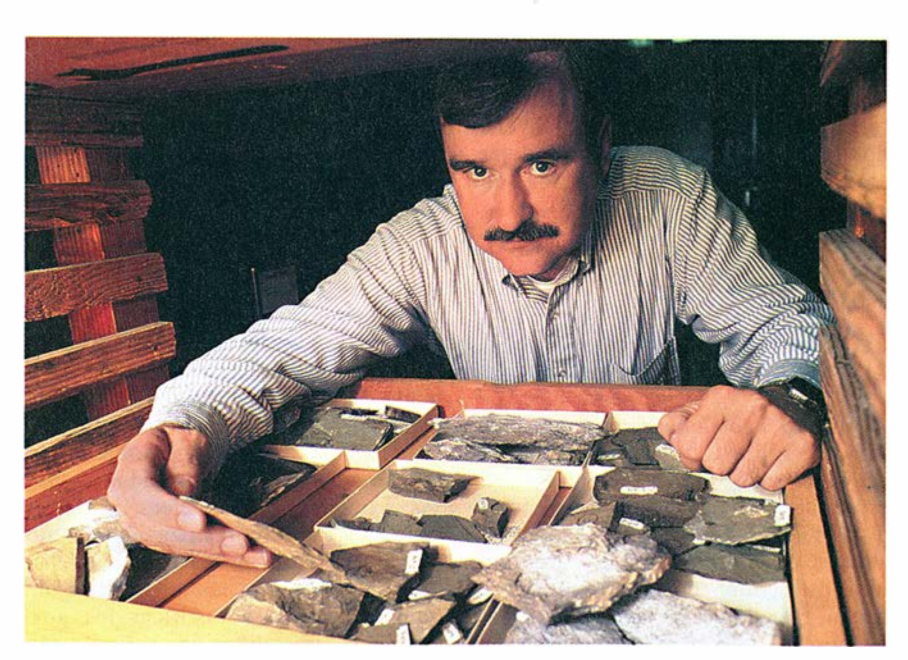
A mediados de 1992, Philip W. Signor, de la Universidad de California en Davis, llamó la atención de los expertos al anunciar el descubrimiento de una sexta extinción en masa, descalabro que, en su opinión, tuvo un alcance mucho mayor que los restantes. Sucedió, dice, hace más de 500 millones de años, en el Cámbrico temprano, cuando los animales pluricelulares apenas empezaban a nadar en los mares. Extinción que, por paradójico que parezca, pudiera explicar la explosión del Cámbrico: la espectacular formación, bastante rápida, de planes corporales durante el Cámbrico temprano.

Se sabe que otras extinciones en masa han espoleado la aparición de nuevas clases de organismos en un escenario ecológico ahora vacío. Los mamíferos, por ejemplo, proliferaron después de la desaparición de los dinosaurios. Si Signor está en lo cierto, la catástrofe pudo haber formado parte del relato de la vida desde el principio. La supuesta extinción que propone aconteció unos 10 millones de años antes del inicio del período Cámbrico, hace de 510 a 560 millones de años, y provocó la desaparición del 80 por ciento de los géneros en un intervalo temporal de cinco millones de años. Entre las bajas del Cámbrico había equinodermos (los antepasados de las estrellas de mar y los crinoideos actuales), braquiópodos y moluscos.

Compárense esos datos con la mortandad de finales del Pérmico, 300 millones de años después y considerada la más catastrófica, que acabó, en un lapso de cinco millones de años, con el 60 por ciento de todos los géneros. De donde se infiere que el episodio de Signor sería el mayor a la vez que el más antiguo; se apoya éste en una base de datos de 850 géneros cámbricos, creada a partir de los trabajos de otros investigadores.

Se había hablado ya con anterioridad de ciertas discontinuidades durante el Cámbrico. Pero no se habían percatado los expertos, sugiere Signo, del alcance real del fenómeno porque la investigación faunística del Cámbrico no había sido objeto todavía de un trabajo de catalogación. A modo de ejemplo, Françoise Debrenne, del Instituto de Paleontología de París, convenció tiempo atrás a sus colegas de que muchos Arqueociátidos, esponjas primitivas formadoras de arrecifes, desaparecieron entonces. El propio John J. Sepkoski, Jr., paleontólogo de la Universidad de Chicago y autoridad en extinciones en masa, aludió también, años ha, a extinciones generalizadas en el Cámbrico temprano, pero reconoce que Signor ha reunido más datos y ha mejorado la precisión cronológica.

Domina, sin embargo, el escepticismo ante el nuevo episodio exterminador. "No es tan fácil interpretar los datos compilados por Signor; piénsese que el Cámbrico temprano fue una época de tasa de renovación muy rápida", avisa Sepkoski, "y los animales pluricelulares apenas iniciaban su andadura". Con ese telón de fondo turbulento, en que la mitad de los géneros desaparecía cada cinco millones de años, el episodio alegado por Signor ni siquiera dobló la tasa de extinción. En cambio, el acontecimiento que barrió a los dinosaurios (para muchos desencadenado por un meteorito o por un vulcanismo generalizado) decuplicó las tasas de extinción, señala el paleontólogo Sepkoski.



Philip W. Signor, de la Universidad de California en Davis, cree haber encontrado pruebas en el registro fósil de un episodio de extinción en masa, el más antiguo y arrasador.

Si quiere ganar mayor credibilidad, Signor tendrá que escribir algo más que la página solitaria esbozada hasta ahora. Convendrá aclarar, además, el fenómeno causante, habida cuenta de que el registro geológico no aporta pruebas de impactos de meteoritos ni erupciones. Sí parece que bajara el nivel del mar durante el Cámbrico temprano, a consecuencia quizás de la actividad de tectónica de placas y de un cambio en las corrientes oceánicas. Basta un cambio leve en la temperatura para reducir la fertilidad de los organismos marinos, precipitando así su extinción.

Allison R. Palmer, jefe del Instituto de Estudios Cámbricos en Boulder y experto en trilobites, discrepa de lo que considera un constructo artificial de Signor. Palmer ha demostrado que hubo varios episodios de extinción más avanzado el Cámbrico, si bien nada que adquiriera proporciones globales; cuestiona, además, la precisión del calendario de Signor, y observa que los trilobites no manifiestan ningún indicio de hiatos extraordinarios en la época concernida. Simon Conway Morris, de la Universidad de Cambridge, que estudia otros fósiles del Cámbrico, se muestra también cauto ante la hipótesis de Signor. Nuestro conocimiento de la taxonomía de los animales del Cámbrico temprano "se halla en un estado deplorable", señala. La taxonomía imperfecta puede sesgar conclusiones que se basan en el recuento de grupos de animales.

Signor exculpa a la taxonomía del sesgo observado en la tendencia de la diversidad de las especies. Aun reconociendo el carácter indefinido de su datación del episodio, "no debiera negarse el hecho incontrovertido de la caída drástica de la diversidad faunística a principios del Cámbrico".

Mineralogía

Zonación oscilatoria en soluciones sólidas

Cuando hablamos de organización en sólidos, pensamos automáticamente en el orden inherente a la estructura cristalina, es decir, en la disposición ordenada que adoptan los átomos en los cristales. La arquitectura estructural cristalina no es un hecho casual, es la consecuencia de un proceso que lleva a los átomos a organizarse para conseguir una configuración estable que minimiza la energía libre del sistema. Es el resultado de la búsqueda del equilibrio termodinámico.

Sin embargo, en los sólidos son posibles otros fenómenos organizativos que no responden al imperativo de la estabilidad, sino que se dan sólo cuando el sistema se encuentra en condiciones alejadas del equilibrio, durante el crecimiento cristalino. Algunos de estos fenómenos son tan sutiles que no llegan a registrarse a través de configuraciones observables en el sólido. Otros se materializan y pueden ponerse de manifiesto mediante el uso de técnicas apropiadas.

En 1987 un grupo de investigadores españoles (J. M. García-Ruiz, A. Santos y E. Alfaro) demostró que, en determinadas condiciones, la velocidad de crecimiento de un cristal puede sufrir variaciones de ritmo oscilatorio. El fenómeno, en todo comparable con las reacciones químicas oscilantes, sólo podía ser interpretado como resultado de un proceso de autoorganización del sistema formado por el cristal y el medio de cristalización. Mas, para apreciar tal comportamiento, hemos de seguir paso a paso la historia del crecimiento del cristal. Una vez terminado el proceso de crecimiento no queda ningún registro en el sólido que sirva de testigo del fenómeno. Se trata, por tanto, de una estructura efímera en el tiempo.

Existen, no obstante, fenómenos de autoorganización que originan estructuras que permanecen en el sólido después de finalizar el proceso de crecimiento. La materialización de conductas oscilatorias es posible cuando la composición del cristal no es fija, sino que varía dentro de ciertos límites. En ese caso, la presencia de oscilaciones químicas en el sistema puede crear bandas sucesivas de crecimiento en las que la composición cambia de manera rítmica.

Los bandeados de este tipo, conocidos por "zonados oscilatorios", aparecen con cierta frecuencia en cristales naturales. Pero, salvo excepciones, los mineralogistas se han inclinado por explicaciones del fenómeno basadas en variaciones en la composición del medio de cristalización o en cambios periódicos de temperatura y presión debidos a causas externas. Sólo recientemente el concepto de autoorganización ha ido abriéndose paso en las ciencias de la Tierra, venciendo las reticencias de quienes tendían a justificar los procesos de cristalización natural con referencia exclusiva a la termodinámica del equilibrio.

Si alguien tiene el mérito de haber aplicado las ideas de G. Nicolis e I. Prigogine a sistemas geológicos es, sin duda, Peter Ortoleva, de la Universidad de Indiana. Sus trabajos acerca de la autoorganización geoquímica han permitido comprender que muchas configuraciones que aparecen en sistemas geológicos, y en particular algunos zonados oscilatorios, pueden responder a fenómenos de autoorganización que requieren desequilibrio.

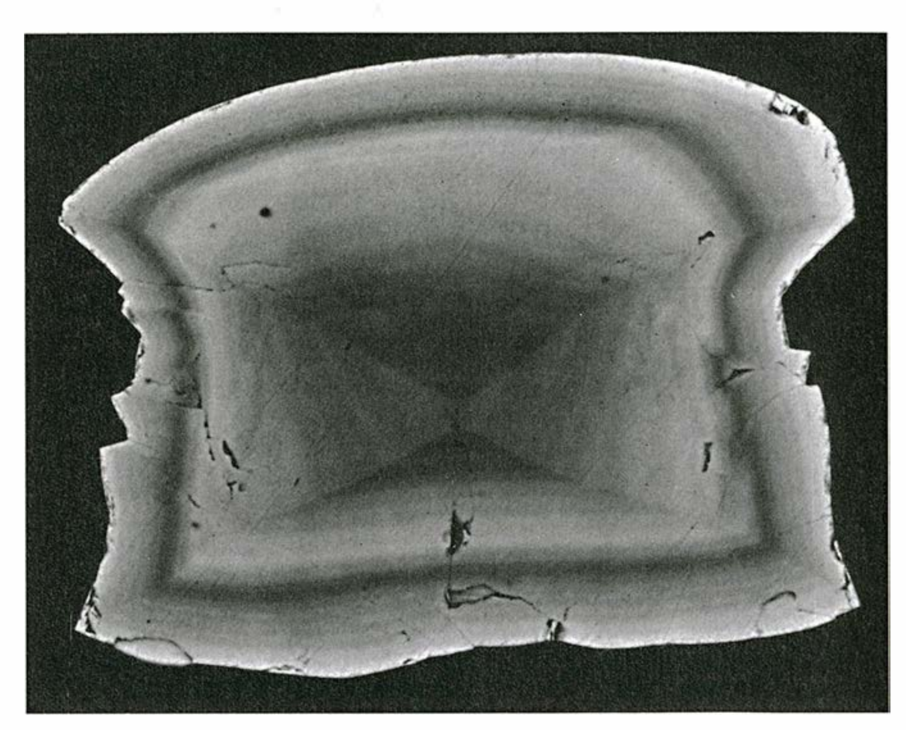
No obstante, había que pasar de la especulación a la realización de experiencias de cristalización en condiciones controladas. De ahí la enorme repercusión que ha tenido la obtención en el laboratorio de cristales de $(Ba,Sr)SO_4$ con zonación composicional oscilatoria. L. Fernández-Díaz, de la Universidad de Madrid, y M. Prieto, de la Universidad de Oviedo, en colaboración con A. Putnis de la Universidad de Cambridge, han demostrado con sus experimentos que la zonación oscilatoria puede tener lugar sin necesidad de invocar variaciones periódicas en parámetros intensivos controlados externamente. Se abre de este modo el camino para la futura síntesis en el laboratorio de nuevos materiales que presenten este tipo de oscilaciones. Cualquier avance en esta línea dependerá, sin embargo, del grado de comprensión que alcancemos acerca de los mecanismos íntimos del fenómeno, algunas de cuyas claves se exponen a continuación.

La idea de composición variable, implícita en la noción de zonación química, choca con los requisitos de composición definida y homogeneidad propios de los cristales perfectos. Dado que los átomos que constituyen un cristal ocupan posiciones geométricamente específicas en la estructura cristalina, su proporción relativa habrá de ser fija y sencilla, en consonancia con una fórmula química estequiométrica. Sin embargo, es concebible que átomos de tamaño y propiedades químicas similares puedan sustituirse mutuamente en una estructura cristalina y formar soluciones sólidas.

En las soluciones sólidas, el orden geométrico se mantiene, pero no el orden químico; la sustitución es, por su propia naturaleza, aleatoria. Además, puesto que la sustitución puede realizarse en diferentes proporciones, la composición de los sólidos deja de ser definida, pudiendo variar entre unos límites que dependen de la tolerancia a la sustitución y que son específicos para cada caso.

La consecuencia más espectacular de la variabilidad química de las so-

luciones sólidas estriba en la formación de cristales de composición heterogénea a partir de fases fluidas multicomponentes. Aun cuando la cristalización se produzca en sistemas cerrados y en condiciones próximas al equilibrio, el proceso de crecimiento irá unido a una evolución del quimismo del sólido, del fluido y de la interfase. Los átomos de sustitución no se incorporan al sólido en la misma proporción que tienen en la fase fluida, sino que lo hacen selectivamente, de acuerdo con un coeficiente de distribución característico del sistema. Ello significa que la composición del fluido se modifica con la deposición de cada capa incremental y que el cristal se va enriqueciendo en uno de los componentes de la solución sólida, al tiempo que se empobrece en el otro. El resultado es una zonación progresiva, tal como la describieron en 1925 H. A. Doerner y W. M. Hoskins, en un histórico trabajo sobre precipitación de soluciones sólidas a partir de soluciones acuosas.



Cristal de $(Ba,Sr)SO_4$ con zonado oscilatorio en el que se observan zonas ricas en bario (bandas claras) *y en estroncio* (bandas oscuras). *Se trata de una imagen de microscopía electrónica de barrido en la que se han recogido los electrones retrodispersados. Mediante esta técnica, las variaciones en la composición dan lugar a diferentes matices de gris, lo que permite distinguir las regiones ricas en bario de las regiones ricas en estroncio. En la fotografía puede observarse también una zonación por sectores, superpuesta al zonado oscilatorio.*

La idea de evolución gradual del quimismo es también aplicable a situaciones alejadas del equilibrio. La única diferencia radica en que, en este caso, la composición de cada capa incremental no se rige por coeficientes de distribución termodinámicos, sino que es fruto de procesos microscópicos de carácter estadístico que operan en la interfase cristalina. Salvada esta acotación, parece evidente que la zonación progresiva debería ser también la conducta usual en condiciones de desequilibrio.

¿Qué circunstancias pueden entonces alterar la pauta de evolución gradual y generar un zonado oscilatorio? La respuesta nos la ofrecen Nicolis y Prigogine: si la zonación oscilatoria responde a un fenómeno de autoorganización, habrá desequilibrio, pero además deben existir procesos acoplados que se retroalimenten. El problema radica, por tanto, en dilucidar qué mecanismos de retroalimentación pueden ser operativos durante la cristalización de una solución sólida.

Una posible, quizá la más obvia, fuente de retroalimentación es la adsorción superficial autocatalítica. Consideremos la cristalización de una solución sólida *A-B* a partir de unidades *A* y *B*, presentes en la fase fluida. Los fenómenos de autocatálisis de superficie surgen cuando —por culpa de las distorsiones provocadas en la red cristalina, del enlace químico, de preferencias de empaquetamiento o de efectos puramente cinéticos— la precipitación de unidades *A* sobre una superficie rica en *A* se ve favorecida con respecto a la incorporación de unidades *B*. A medida que progresa la incorporación autocatalítica de *A* al sólido, disminuye su concentración en el líquido y aumenta la concentración de *B*.

El proceso continúa hasta que la escasa presencia de *A* y la elevada concentración de *B* en el fluido fuerzan la conmutación y ulterior crecimiento de capas ricas en *B*. De manera similar, el crecimiento de capas ricas en *B* proseguirá hasta que el aumento de la concentración de *A* en el fluido dé lugar a una nueva etapa de crecimiento rica en *A*. La naturaleza autocatalítica de las velocidades de incorporación de *A* y *B* constituye, pues, un potencial de retroalimentación para la conducta oscilatoria. Ni que decir tiene que, para que tal conducta se dé, es necesario, además, un control cinético del transporte sobre el proceso de crecimiento, de manera que la incorporación selectiva genere gradientes de concentración en la fase fluida, en las proximidades de la interfase cristalina.

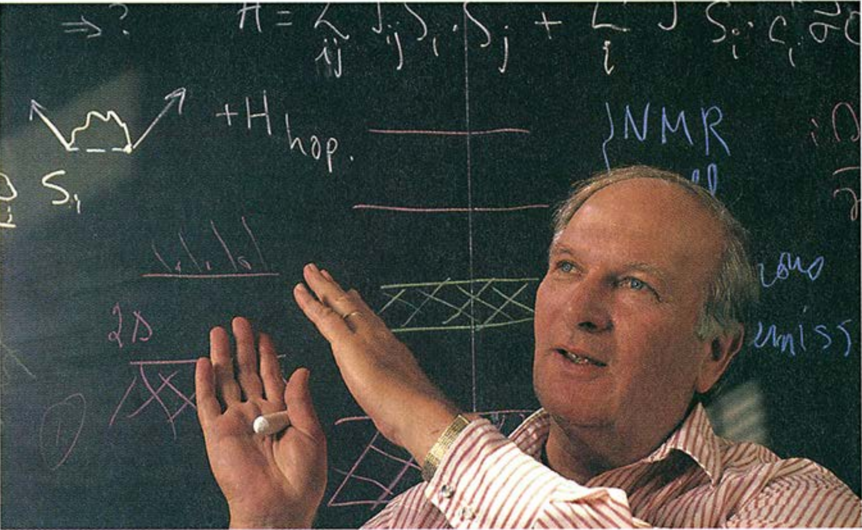
La autocatálisis de superficie no es, por supuesto, la única fuente de retroalimentación reacción-transporte. Existen otras alternativas, más o menos elegantes y complejas. De hecho, M. Prieto, L. Fernández-Díaz y A. Putnis han desarrollado una hipótesis, basada en el concepto de "selección estadística" de la composición del sólido, que tiene la virtualidad de justificar la superposición de zonados oscilatorios y sectoriales característica de los cristales de sus experimentos. En cualquier caso, el progreso futuro en esta línea pasa por una modelización que vaya más allá de la justificación cualitativa de los fenómenos. Sólo así se podrá conseguir el control experimental de las pautas de oscilación, y quizá la síntesis de nuevos materiales cuyo interés tecnológico provenga precisamente de sus zonados composicionales. (M. Prieto, departamento de geología de la Universidad de Oviedo.)

Resistencia teórica

¿De dónde le viene a ciertas cerámicas su propiedad superconductora?

Hace algo más de seis años, los físicos recibieron un regalo inesperado: la confirmación japonesa del famoso hallazgo de J. Georg Bednorz y K. Alex Müller en el la-





IDEAS ACTUALES: Philip W. Anderson, de la Universidad de Princeton (arriba), *quiere renovar los modelos convencionales para explicar la superconductividad de alta temperatura. Robert Schrieffer, de la Universidad estatal de Florida* (abajo), *piensa que sólo se necesitan algunas modificaciones clave.*

boratorio de investigación de IBM de Zurich. En síntesis, ciertas cerámicas conducían electricidad sin resistencia a la temperatura, razonablemente templada, de unos 30 kelvins. Mas, por mucho que se siguió estudiando, nadie ha dado con el motivo de semejante fenómeno. Todas las teorías de superconductividad a altas temperaturas admiten alguna resistencia.

Las cerámicas superconductoras constan de capas paralelas de cobre-oxígeno mezcladas con itrio, bario o lantano, entre otros elementos. Hay una cuarentena de tales compuestos de óxido de cobre, o cupratos, cada uno con su propia temperatura de transición superconductora. El récord actual de la temperatura crítica más elevada corresponde a un cuprato de talio, que se torna superconductor a 130 kelvins (–143 grados Celsius).

Se ignora el motivo de que los electrones procedan con entera libertad por entre las capas de cobre y oxígeno. La teoría de la superconductividad operaba con el modelo BCS, propuesto en 1957 por John Bardeen, Leon N. Cooper y Robert Schrieffer para explicar el comportamiento de los superconductores metálicos clásicos de baja temperatura. En ese marco, los fonones, que son vibraciones de la red del material, dispersan los electrones. No obstante poseer los electrones la misma carga y repelerse entre sí, la dispersión fonónica induce el "apareamiento" entre aquéllos. Así enlazados, los pares de electrones de Cooper, como se les conoce, fluyen a través del conductor sin encontrar resistencia.

Los cupratos constituyeron una auténtica sorpresa. A pesar de que los electrones forman pareja en los óxidos de cobre, "el modelo BCS posiblemente no sea aplicable", dice Philip W. Anderson, premio Nobel. A la temperatura de transición observada, las vibraciones de la red deberían interrumpir el flujo superconductor. "La gente se ha esforzado en generalizar el modelo BCS, pero sólo ha conseguido liar el asunto", reprocha Anderson.

En parte, la incapacidad de formular una teoría válida reside en la dificultad que entraña definir qué sean exactamente los cupratos. Se les puede considerar metales "normales"; pese a su naturaleza quebradiza y rígida, los cupratos conducen la electricidad. En línea con el trabajo seminal del físico ruso Lev D. Landau, el comportamiento de los metales ordinarios se ajusta a la teoría de líquidos expuesta por Fermi, que explica dicha conducta a baja temperatura prescindiendo de la repulsión entre las cargas de los electrones. Landau sostenía que podían sustituirse los electrones por "cuasipartículas", que no interaccionan fuertemente entre sí. (Para los físicos experimentales, estas cuasipartículas son electrones.)

Mas, para nuestro infortunio, las propiedades de los metales normales no se manifiestan en los experimentos realizados con cupratos. Cierta clase de ensayos de ésos analiza el efecto Hall: el desplazamiento lateral que experimentan los electrones cuando fluyen a través de un metal sometido a un campo magnético. El desplazamiento crea el campo de Hall, un campo eléctrico. En los metales, el campo de Hall es independiente de las temperaturas traspasado el umbral de los 100 kelvin; sin embargo, en los cupratos el campo de Hall refleja una estrecha dependencia de la temperatura por encima del punto de transición. Otros experimentos recientes corroboran la idea de que los cupratos trascienden cuanto se atribuye a los metales clásicos.

Los teóricos barajan varias explicaciones de los resultados de los ensayos, mientras esbozan un modelo que razone cómo ocurre el necesario apareamiento de los electrones. Schrieffer, de la Universidad estatal de Florida, defiende que los cupratos son metales ordinarios y dotados de una propiedad magnética que fuerza a los espines de los electrones de átomos de cobre vecinos a alinearse de manera opuesta. Los fonones desempeñan un papel secundario a la hora de fijar la temperatura crítica en los cupratos. Schrieffer cree que las cuasipartículas se aparean en

una “bolsa de espín”, un constructo teórico al que compara con una tira de goma. Si cayera una bola sobre la tira, la deformaría. Una segunda pelota sería atraída por la indentación y rodaría hacia ella, formando un par ligado.

Mientras Schrieffer se limitaría a añadir unos apéndices a la teoría de la superconductividad, Anderson la reescribiría por entero. En opinión del segundo, el estado normal de los materiales difiere radicalmente; Anderson separa dos propiedades de las cuasipartículas —carga y espín— en partículas diferentes: espinones y holones. Los espinones serían partículas neutras con espín; los holones tendrían carga positiva, pero no espín. Ese líquido hipotético de holones y espinones presenta propiedades insólitas; una de ellas es que el líquido se encuentra confinado entre los planos de cobre y oxígeno. Por encima de la temperatura crítica, el confinamiento dificulta la conducción en la dirección perpendicular a los planos (el eje *c*), característica manifiesta, aunque apenas entendida, de los cupratos.

En el modelo de Anderson, la interacción responsable de la alta temperatura de transición viene a ser una recuperación de la conductividad en el eje *c*. Los cálculos muestran que tan sólo los pares de electrones pueden atravesar los planos por efecto túnel; no así los electrones solitarios. En el estado superconductor, el cuprato se convierte en un metal tridimensional a través del cual viajan los pares de electrones. De manera conveniente, “mi mecanismo de acoplo entre planos actúa en paralelo con cualquiera de los efectos BCS”, mantiene Anderson.

No todos están de acuerdo. Algunos han maquillado las ideas de Anderson, porque los cálculos sólo pueden resolverse completamente en una dimensión. “Que los sistemas de dos y tres dimensiones deban comportarse como los unidimensionales no está probado,” objeta Chandra M. Varma, de los laboratorios AT&T Bell. Varma atempera las ideas básicas de Anderson y representa los cupratos como un “líquido de Fermi marginal”.

Patrick A. Lee, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y otros han aplicado cálculos de mecánica cuántica a las nociones fundamentales de Anderson. Ha surgido así el modelo *t-J* (donde *t* remite a la energía cinética del electrón, y *J* es la interacción entre los espines de los electrones). De acuerdo con este modelo, importa menos por qué es tan alta la temperatura de transición, que el motivo de que sea tan baja. El modelo *t-J* indica que la superconductividad se suspende con las fluctuaciones, o variaciones en el movimiento de los electrones. Todas las hipótesis tienen su talón de Aquiles. Los electrones en bolsas de espín pueden repelerse unos a otros; las ideas de Varma no entran en el fenómeno del acoplamiento y los cálculos del modelo *t-J* requieren varias aproximaciones para dar las respuestas correctas.

En la Universidad de Osaka se ha realizado un experimento que abona la tesis de Anderson; allí, un óxido de cobre, con matriz de calcio y estroncio, parece tener una temperatura crítica cercana a los 160 kelvins, la más elevada registrada hasta la fecha. De confirmarse, este resultado corroboraría los cálculos de Anderson.

Este compuesto sugiere que las teorías de la superconductividad pueden ser predictivas, un gran paso desde el modelo estándar BCS, que sólo era descriptivo, y, por consiguiente, podría buscarse un compuesto que tuviera el máximo número de capas adyacentes de cobre y oxígeno y el acoplamiento más fuerte entre las capas. En otras palabras, las temperaturas críticas más altas deberían ocurrir presumiblemente cuando todas las capas son idénticas y mantienen el mismo intervalo espacial. El supuesto superconductor de 160 kelvins no es más que un compuesto de “infinitas capas”. (Los cupratos al uso presentan sólo dos o tres capas adyacentes.)

Una teoría sólida indicaría el camino a seguir para crear nuevos superconductores, y, unida a los experimentos previstos para este curso, podría acotar mucho mejor los conceptos. Se han abandonado ya algunas ideas populares anteriores, tales como la noción de que la superconductividad se inducía por alones (“anyons”). Pero sea cual sea la teoría que al fin prevalezca, los físicos están de acuerdo en un punto. Los cupratos no se parecen a nada de lo visto anteriormente: no son un aislante pero tampoco son del todo un metal.

Indoeuropeos

Limitaciones de la genética

¿Empezaron las oleadas de jinetes indoeuropeos su cabalgadura, hace unos 6500 años, desde las estepas meridionales de Rusia, difundiendo su lengua a medida que iban sojuzgando a los campesinos que vivían entre Grecia y el Ganges? ¿O fue 2500 años antes cuando comenzó a expandirse desde el Oriente Medio la vasta familia de las lenguas indoeuropeas, allá por la época en que los pueblos agricultores se trasladaron en busca de tierras de labor y arrollaron a su paso todas las culturas cazadoras-recolectoras?

Lejos de resolver este enigma prehistórico, el estudio reciente de las pautas genéticas europeas realizado por Robert R. Sokal y su equipo, de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, ha fracasado a la hora de prestar respaldo a una u otra hipótesis; ni la primera ni la segunda explican satisfactoriamente la correlación que ha sido observada entre lenguas y genes de Europa.

Sokal acometió la comprobación de un modelo que, para justificar la expansión de la agricultura desde el Creciente Fértil, había sido propuesto con anterioridad por Albert J. Ammerman, de la Universidad de Parma, y L. L. Cavalli Sforza, de Stanford. Defendían éstos que las huellas de una eclosión demográfica provocada por la invención de la agricultura en el Creciente Fértil trenzaban una tendencia genética entre los extremos sudoriental y noroccidental de Europa.

En el parecer de los genéticos, la propagación de la agricultura se habría debido no tanto al intercambio cultural cuanto a la sustitución demográfica. En 1987 Colin Renfrew, de la Universidad de Cambridge, aplicó el modelo a sus análisis del registro arqueológico para explicar la difusión de las lenguas indoeuropeas.

El equipo de Stony Brook cartografió las pautas genéticas europeas, poniéndolas en relación con el registro arqueológico de las primeras culturas agrícolas. De este modo confirmó el soporte demográfico de la teoría. Al final del estudio se advertía la necesidad de seguir investigando para comprobar el componente lingüístico, que abarcaría diez áreas transicionales postagrícolas donde las subfamilias indoeuropeas se habrían ido diferenciando hasta alcanzar su forma actual.

El último trabajo de Sokal, publicado en los *Proceedings of the National Academy of Sciences*, deja ese aspecto colgando en el aire, aunque balanceándose en torno a la teoría belicista de Marija Gimbutas, arqueóloga de la Universidad de California en Los Angeles. Sokal y los suyos analizaron las pautas genéticas de muchas poblaciones europeas di-

ferentes, y crearon su oportuno árbol genealógico.

Compararon luego el dendrograma con otro en el que se implicaban 43 lenguas europeas conjuntadas por Merritt Ruhlen, lingüista taxonomista; descubrieron la presencia de una correlación del orden de 0,14 entre los genes y los lenguajes.

Calcularon luego la cuantía de dicha correlación que podría atribuirse a la mera distancia geográfica, factor éste que singulariza genes y lenguajes en tándem. Manteniendo constante la geografía, los expertos en estadística de la universidad neoyorquina se encontraron con que quedaba un promedio de 0,06 de correlación entre lenguas y genes. Este residuo sigue todavía pendiente de explicación.

Para demostrar dónde yace la cruz del experimento, Sokal superpone, sobre un mapa de Europa, la teoría de Renfrew y luego la de Gimbutas. "Si la teoría de Renfrew fuese verdadera", dice, "debería dar cuenta del resto de la correlación, que entonces se reduciría a cero. Pero lo cierto es que ahí no hay cambio: persiste el 0,06. Y lo mismo sucede cuando añades lo de Gimbutas: queda ese 0,06 de correlación."

Sokal insiste en el carácter significativo de esa cifra. "No todo locus génico suele diferenciarse durante los orígenes de distintas poblaciones. En una comparación entre poblaciones modernas racialmente diversas —italianos, nigerianos y japoneses— los italianos se diferenciaron de las otras dos poblaciones hasta un 0,2 en sólo el 20,4 por ciento de los casos", recalca.

¿Cómo razona Sokal la correlación? Se niega a ofrecer un modelo, aunque lanza un esbozo de hipótesis de lo que pudo ocurrir. Si la geografía es incapaz de explicar la concurrencia de lenguas y genes, entonces es que unas y otros debieron empezar a evolucionar paralelamente en algún otro lugar, quizá fuera de Europa. En tal caso, habrían entrado aquí con inmigrantes que aún nos son desconocidos.

Luz a la carrera

¿Podrán las redes informáticas canalizar el tráfico de datos?

Hace ya decenios que visionarios de la talla de Aldous Huxley, Marshall McLuhan o Vannebar Bush han venido pronosticando tiempos en los que la información de todo tipo —datos, texto, imágenes estáticas o de vídeo, sonido— acabarían tan accesibles como el agua del grifo. Los precursores de la tecnología de la información se percataron de la necesidad de robustos enlaces de comunicaciones. De todos modos, casi todos hallábanse convencidos de que las redes telefónicas e informáticas existentes constituían una infraestructura sólida en la que asentar las futuras autopistas para la transmisión de datos.

Nos encontramos ahora amenazados por un bloqueo total de las redes de comunicaciones, obstruidos sus nodos por una avalancha de gigabits. "Nos hallamos en el umbral de una discontinuidad técnica", opina Richard D. Gitlin, director del departamento de investigación de redes de comunicaciones en los Laboratorios AT&T Bell.

Arun N. Netravali, director ejecutivo de la división de investigación en ciencias de las comunicaciones en los Laboratorios Bell, pone como ejemplo sintomático del problema la reciente racha de fallos en los servicios de comunicaciones. "Lo que necesitamos es un nuevo paradigma para las comunicaciones informáticas", declara.

Tratando de eludir el desastre que se está gestando, las compañías telefónicas empiezan a encarar el hecho de que los sistemas tradicionalmente utilizados para establecer comunicaciones verbales ya no resultan idóneos. La comunidad informática reconoce que las demandas exigidas al sistema desbordan la capacidad de los equipos y programas utilizados para tender redes sobre zonas poco extensas.

Los expertos en comunicaciones y en informática están empezando a examinar juntos qué ocurrirá cuando prácticamente todas las características de la red —excepto la velocidad de la luz— puedan variar a voluntad.

La idea de que los especialistas en redes y los informáticos unan sus fuerzas en el diseño de redes de muy alta velocidad puede parecer lógica; tropieza empero con más de dos decenios de rivalidad.

Las compañías telefónicas siguen todavía gestionando casi todas las llamadas por la técnica de conmutación de circuitos, equivalente electrónico de la función desempeñada otrora por las antiguas operadoras de centralitas, que establecían enlaces físicos entre las líneas de los abonados. Una conversación telefónica ocupa un espacio predictible en la red de comunicaciones, al que se denomina "anchura de banda", y comporta intercambios instantáneos de información. Dado que la conmutación de circuitos ofrecía canales especializados para la transmisión en tiempo real de flujos continuos de información, la técnica resultaba idónea para el envío de voz humana a través del éter.

Sin embargo, cuando los ordenadores empezaron a conversar entre sí en el decenio de los setenta, se empezó enseguida a exigir de los enlaces de comunicaciones existentes prestaciones muy distintas. Los 64 kilobits por segundo de anchura de banda que podían ofrecer las más avanzadas redes de transmisión de voz no pasaban de ser mediocres y atascadas carreteras comarcales para quienes necesitaban enviar megabits de datos.

En lugar de apoyarse en las anchuras de banda fijas que establecía la conmutación de circuitos, los ingenieros informáticos idearon técnicas para la compartición del ancho de banda, basadas en el envío de información en ráfagas de tamaño irregular y en la compartición por varios equipos de los canales disponibles, que hacían uso cuasi-simultáneo de los mismos por intercalación de ráfagas. Los datos a transmitir eran divididos en trozos y envasados en cápsulas o "paquetes", cada uno de los cuales contenía detalles atinentes al contenido y al destino del mensaje. Para reducir al mínimo el tiempo de tránsito de los paquetes, los ingenieros imponían una pesada carga computacional sobre las centrales de conmutación responsables de encaminar los datos.

No obstante, las diferencias entre ambos bandos comenzaron a difuminarse cuando los ingenieros informáticos y los de comunicaciones se dieron cuenta de que unos y otros deseaban enviar la misma clase de información, fueran datos o vídeo. "Llegados a velocidades altas, la conmutación por paquetes resulta más adecuada en las redes para un amplio espectro de servicios", afirma Inder S. Gopal, que se ocupa de la gestión de redes de banda ancha en IBM.

Gopal está convencido de que las telecomunicaciones pueden acabar pronto pareciéndose mucho a la computación distribuida. Aunque el 99 por ciento de las redes telefónicas se basan todavía en la conmutación de circuitos, las compañías se han comprometido a adoptar la conmutación por paquetes. "Cuando lleguemos a las redes de 150 gigabits por segundo pasaremos a la conmutación por paquetes", afirma W. David Sincoskie, director ejecutivo de investi-

gación en redes de ordenadores de Bellcore, brazo investigador de las compañías telefónicas regionales en los Estados Unidos.

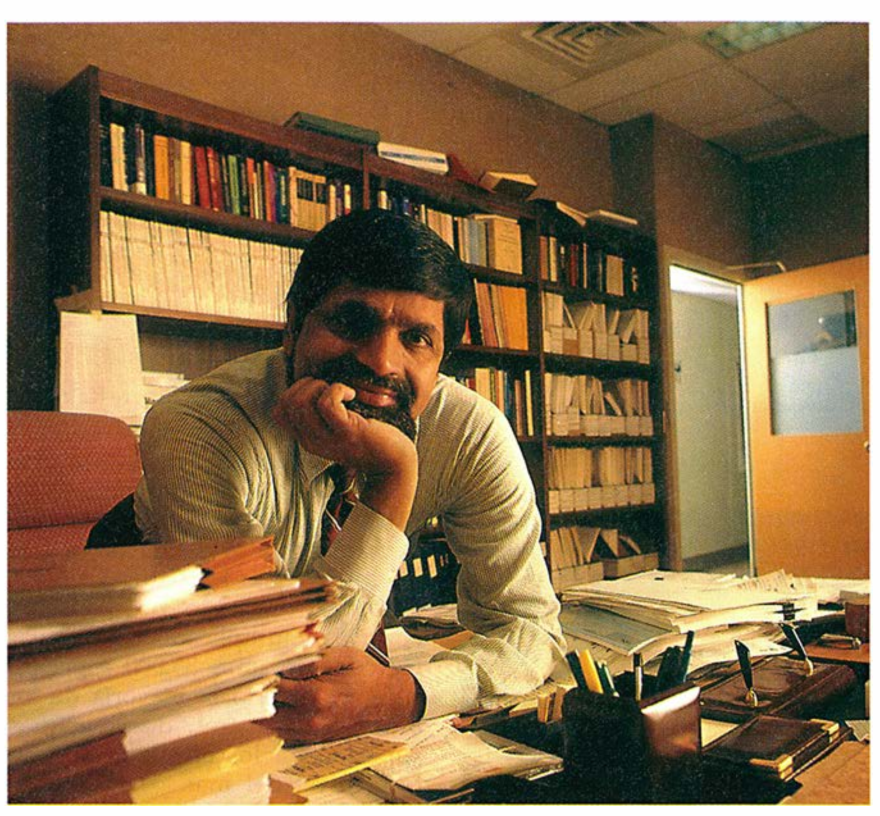
A mediados del decenio de 1980, la industria de comunicaciones comenzó la codificación de los protocolos del llamado "modo de transmisión asíncrono" (ATM), con la esperanza de crear una norma internacional para la conmutación por paquetes a alta velocidad. Empero, en su forma tradicional, la conmutación por paquetes no carece de limitaciones. Dado que los usuarios esperan la misma clase de respuesta instantánea que les proporcionan las llamadas de audio, las redes de conmutación por paquetes han de remedar la impresión de ser una línea de uso privado y exclusivo.

En consecuencia, los ingenieros han empezado a habérselas con los embotellamientos provocados por la pesada tarea de procesamiento con que han cargado sus nodos y centrales. "En el pasado, toda la investigación estaba orientada a la optimización del ancho de banda", explica Gopal. Las redes de fibra óptica, capaces de transportar decenas de terabits de información por segundo, pusieron fin a tal limitación. En el presente, cada nanosegundo extra que la red dedica al examen de un paquete es tiempo perdido.

"Ni siquiera en una red de alta velocidad podemos modificar la velocidad de la luz", señala Netravali. Al enviar señales desde Nueva York a California —sea por caso— a través de enlaces de gigabits por segundo, es muy posible que se encuentren en tránsito medio millón de paquetes antes de que sea recibido el primero, y no digamos ya, verificado.

Para esquivar los atascos de procesamiento, dice Gopal, los ingenieros están diseñando protocolos simplificados. Por ejemplo, la verificación de los mensajes podría hacerse tan sólo cuando alcanzasen su destino definitivo y no durante el tránsito. Y en lugar de utilizar ordenadores de uso general, por veloces que sean, en el papel de centralitas o puntos de conmutación, las compañías están construyendo dispositivos rápidos especializados. Hoy tenemos en liza los sistemas "Planeta", debido a IBM y "Rayo de sol", desarrollado por Bellcore.

Tras varios años de exploración en laboratorio de estos problemas, se les está dando a los investigadores la oportunidad de poner en servicio sus sistemas de distribución y sus protocolos. El gobierno estadounidense, de consuno con la industria, financia una serie de experimentos encaminados a sentar los cimientos de una red nacional para investigación y educación, con capacidad de muchos gigabits por segundo.



Arun N. Natravali, de los Laboratorios AT&T Bell, ve emerger un nuevo paradigma en las comunicaciones, resultante de la fusión de la informática y las telecomunicaciones.

Está previsto que las pruebas den comienzo en plazo breve y duren un año. Aunque las compañías del sector, entre ellas IBM y AT&T, están efectuando por cuenta propia ensayos de construcción de redes de alta velocidad, el banco de pruebas para redes con capacidad de gigabits es el coordinado por una pequeña compañía paraestatal sin ánimo de lucro, la CNRI ("Corporation for National Research Initiatives"), de Reston, Virginia, que constituirá su foro más expresivo.

La fusión de técnicas informáticas y de comunicaciones que está tomando cuerpo en el banco de pruebas de Reston promete desencadenar en rápida proliferación un sinfín de problemas. Por ejemplo, como pregunta Robert E. Kahn, fundador del CNRI, la forma en que podrán los ordenadores sacar partido de los gigabits que van y vienen a través de las redes. Netravali está buscando nuevas arquitecturas basadas en sistemas multimedios que no hayan de examinar bit por bit la riada de información aferente. Tampoco es tarea baladí la de hallar suficientes direcciones para poder conectar a todas las partes interesadas.

Las preguntas anteriores proseguirán en tanto vayan los investigadores dejando disponibles anchuras de banda más y más amplias. Al rebasar la velocidad de cinco gigabits por segundo, opina Gopal, los investigadores tendrán que hallar la forma de llevar los conmutadores electrónicos hasta los bordes mismos de la red, y quizás, en última instancia, suprimirlos por completo. Las redes totalmente ópticas, por ejemplo, podrían servirse de luces de distintas longitudes de onda para la transmisión de información. En Bellcore y en AT&T, los investigadores han diseñado matrices de diminutos láseres que emiten un espectro de longitudes de onda y un equipo de IBM ha estado trabajando con receptores que son rápidamente sintonizables y que recogen sólo determinadas frecuencias.

Si la tecnología lo permite, los investigadores continuarán esforzándose por alcanzar las metas contempladas por los profetas de la era de la tecnología de la información. Kahn se manifiesta optimista y opina que la comunidad científica sacará fruto de las nuevas tecnologías. "Después de todo", bromea, "¿Cómo vamos a hacer que se queden en la granja después de haber visto París?"

De cerca

Fotos y texto: Satoshi Kuribayashi

Mirada de araña



El miedo cerval de muchas personas a las arañas obedece a una impronta atávica de defensa ante el veneno encerrado en la glándula de la uña de los artejos. La naturaleza, sin embargo, ha sido pródiga con ellas: ha multiplicado sus formas (se conocen unas 35.000 especies) y les ha abierto la mayoría de los biótopos terrestres, desde alturas superiores a los 6500 metros hasta el nivel del mar.

Pero su esquema corporal es muy sencillo. Poseen dos regiones, el prosoma y el opistosoma, unidas por un pedicelo estrecho que viene a ser el primer segmento opistosómico modificado, o abdominal. Del prosoma salen los apéndices característicos, es decir, los quelíceros, los pedipalpos y los cuatro pares de patas. De hábitos carnívoros, las arañas se alimentan sólo de animales vivos y en movimiento, lo que explica su permanente atención al entorno. Se repliegan y amenazan con la mirada si el objeto inquieto puede convertirse en su depredador; saltan a degüello, y nunca mejor dicho, ante las hormigas y otras presas deseadas.

Para contemplar ese rito de la vida, me encerré en el estudio. Preparé la escena: la araña sobre una piedra y su posible festín en una hoja vegetal; en su lugar idóneo, un sensor de luz. Al moverse la presa, el salto de la araña dispara el sensor y se activa el obturador de la máquina fotográfica. No fue, empero, hazaña fácil acoplar todos los protagonistas.



Foto de la derecha
distancia focal: 80 mm
diafragma: F = 32
exposición: 1/25.000 de segundo
película: ISO = 50



Lo que "vio" Colón en 1492

Cuando Cristóbal Colón llegó al Nuevo Mundo, venía provisto de un amplio acervo de ideas preconcebidas que condicionaron en grado determinante su percepción del país y de sus habitantes

I. Bernard Cohen

El año pasado, en que se cumplió el Quinto Centenario del primer viaje de Cristóbal Colón, dio ocasión a un buen número de reflexiones sobre el verdadero significado de la gesta del Almirante. Muchos resaltaron que el "Nuevo Mundo" encontrado por Colón era en realidad un mundo antiguo, habitado desde hacía mucho tiempo por una población autóctona dotada de muy diversas culturas. Pero también puede hablarse de un "viejo mundo" en otro sentido algo menos obvio: la percepción de Colón sobre las tierras que descubrió estaba profundamente determinada por sus ideas preconcebidas. En este sentido, sus reacciones fueron las de una persona que se enfrenta a una realidad que presiente, pero no le resulta familiar, algo así como las de un explorador que busca países desconocidos o del científico que trata de sondear los misterios de la naturaleza. Ciertas ideas procedentes de la Biblia, de relatos de anteriores aventureros, de cartógrafos y del sentir general influyeron a su manera en la interpretación de los "descubrimientos" colombinos.

La mayor parte de la información de que disponemos acerca de las ideas de Colón sobre el Nuevo Mundo está contenida en dos documentos: el diario y una carta. Contra los hábitos normales de los marinos de su tiempo, Colón llevó un registro regular, día a día, de su viaje de 1492. Pudo haber sido quizás el primer navegante que se tomó ese trabajo. A su regreso a España, presentó el *Diario* a su patrocinadora, la reina Isabel, que mandó hacer una copia para el Almirante, quedándose ella misma con el original. Aunque ambos manuscritos han desaparecido, Fray Bartolomé de Las Casas, cronista y misionero defensor de los indios, realizó su propia versión del texto de Colón (en parte transcribiéndolo, en parte resumiéndolo), en un manuscrito que es el que realmente se conserva. Las Casas, que fue el primer clérigo ordenado en el Nuevo Mundo, dedicó el resto de su vida a la causa de los indígenas y predicó contra su esclavización.

A comienzos de 1493, poco antes de su retorno a España, Colón escribió una larga carta, como una popular y sumaria versión de su *Diario*. Esta carta estaba dirigida a Luis de Santángel, el cual había ayudado a Colón a la hora de allegar fondos para su viaje, y tal vez a algunas otras personas. La carta fue ampliamente leída y conoció un gran número de ediciones. Fue así la primera fuente publicada sobre los primeros descubrimientos hechos por Colón.

Los actuales lectores de ambos documentos pueden quedar sorprendidos por la falta de interés que Colón demostró hacia los detalles referentes a las tierras que visitó, y por la limitada atención que concedió a la fauna y flora locales. Sus descripciones y referencias sobre la ubicación

I. BERNARD COHEN es profesor emérito de historia de la ciencia en la Universidad de Harvard. Ha terminado recientemente una nueva traducción de los *Principia* de Newton. Ha publicado, entre otros, un volumen de estudios críticos e históricos sobre la interacción entre las ciencias naturales y las ciencias sociales. Este artículo referente a Colón está basado en los materiales para un estudio a largo plazo que prepara sobre la creatividad en la ciencia.



1. INDIGENAS DEL NUEVO MUNDO. Fueron inicialmente representados de acuerdo con las antiguas concepciones o con la sumaria información facilitada por Colón. Esta ilustración sobre una hoja volante publicada en Augsburgo, en 1505, muestra a los nativos como primitivos caníbales. El texto que acompaña refiere que ellos no tienen gobierno ni propiedad privada.

de accidentes son tan lacónicas, que con frecuencia resulta precisa una investigación suplementaria para determinar exactamente dónde se encontraba Colón en el momento de escribir su *Diario*. Por ejemplo, el 12 de octubre de 1492, después de 36 días de viaje desde las Canarias, Colón arribó a una isla que los indios llamaban Guanahaní y que él bautizó como San Salvador, en el archipiélago de las Bahamas. De las descripciones que hace de esta isla, hasta la principal es notablemente breve: "Esta isla es bien grande y muy llana, y de árboles muy verdes, y muchas aguas, y una laguna en medio muy grande, sin ninguna montaña, y toda ella verde, que es placer de mirarla."

Cuando Colón prestaba atención a los detalles de la geografía, generalmente se limitaba a describir los accidentes más notables. También se permitió en ocasiones exagerar, como consecuencia de su admiración. Escribía, por ejemplo, que en Guanahaní hay "un puerto donde cabrían todas las naos de la Cristiandad", una hipérbole comparable a la estimación que hace Marco Polo sobre la navegación por el Yang-tsé, que excede, según él, a la de todos los ríos de Europa juntos.

Las observaciones de Colón fueron también exageradas por lo que se refiere a la búsqueda de bienes útiles que poder ofrecer al rey Fernando y la reina Isabel, que habían financiado su expedición. Sus informes hacen frecuentes alusiones al oro, plata, perlas y piedras preciosas. Pero no reconoció el verdadero y más importante significado de las tierras que él había descubierto. Había pretendido llegar al reino del Gran Khan, a las islas del Japón, a las riquezas de la India. Lo que encontró no era lo que había esperado descubrir, de suerte que los detalles



de aquellas tierras resultaban ser, en tal sentido, irrelevantes. Por el contrario, se veía enfrentado a unos pueblos extraños, que no eran europeos, ni africanos, ni siquiera asiáticos. Los indígenas atrajeron la atención de Colón, sobre todo, porque su belleza natural contradecía el temor que había abrigado de encontrarse con una región prohibida de la Tierra, habitada por monstruos. Por este motivo, Colón anotó con vivos detalles la apariencia de los nativos que halló, sin preocuparse demasiado de constatar lo referente al lugar que aquéllos habitaban.

Las previas lecturas de Colón reforzaban su idea de que su viaje a través del océano había cubierto la mayor parte del camino hacia Extremo Oriente. Escribió extensas notas marginales en su ejemplar de la *Imago Mundi* de Pedro de Ailly, un geógrafo del siglo XV. En el capítulo 11, Colón escribe (citando en parte y en parte parafraseando el texto): "El límite de la tierra habitada hacia el Este y el límite de la tierra habitada hacia el Oeste están muy cercanos, y entre ellos se extiende solamente un pequeño mar." Este pasaje animó a Colón a poner en práctica su plan de partir de Europa hacia el Oeste, para alcanzar la China, o la región de la India.





Tamaña desatención a los detalles geográficos fue común a otros exploradores de la época. Américo Vespuci, por ejemplo, escribió informaciones muy detalladas acerca de los naturales de Sudamérica, pero proporciona una información muy sumaria sobre el territorio en sí. Sólo bien entrado el siglo XVI, cuando ya América estaba claramente reconocida como un continente hasta entonces ignoto, comenzaron los exploradores a dedicar plena atención a la fauna y la flora del Nuevo Mundo.

En marcado contraste con la falta de referencias sobre los aspectos naturales de las islas que visitó, Colón mostró un agudo interés en sus contactos con los pueblos que equivocadamente llamaba "indios". Como ha notado el historiador de la cultura italiano Leonardo Olschki, Colón fue "meticuloso y exhaustivo" facilitando referencias sobre el aspecto de los indígenas, sus costumbres y peculiaridades, "pintando, incluso, su vida y sus hábitos con un realismo perspicaz y expresivo".

Las apreciaciones de Colón sobre los indígenas estuvieron inspiradas en las de los navegantes anteriores a él, en la tradición judeocristiana y en sus propias expectativas. Los libros de la biblioteca de Colón que aún subsisten incluyen ejemplares de obras de Plinio, Eneas Silvio Picolomini (luego papa Pío II), Pedro de Ailly y Marco Polo. Polo relata repetidamente extrañas visiones en países exóticos. Sin embargo, los lectores de su *Millione* (título con el que fue conocida la historia de los viajes de Polo) no pueden formarse un claro juicio, sino más bien resultar sorprendidos o confusos ante sus constantes comparaciones de lo que vio en sus viajes con los seres u objetos similares en Europa. Así, trataba de convertir lo exótico en algo que resultase familiar a la mente de sus lectores. El propio Colón utilizó muchas veces este mismo recurso.

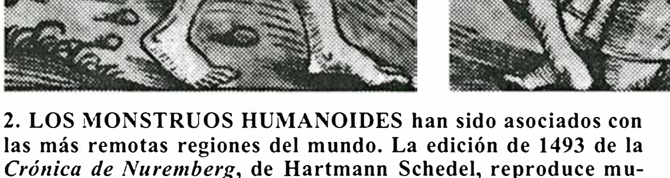
Basándose en su acervo intelectual y cultural, Colón estaba mentalmente preparado para encontrar cinco tipos de seres humanos en el curso de su viaje de 1492. En primer lugar, si alcanzaba Extremo Oriente, como esperaba y deseaba, se encontraría con asiáticos. Los primeros nativos con que se tropezó, los taínos de San Salvador, no eran precisamente los civilizadísimos ciudadanos de la India, China o Japón. Trató de tranquilizarse buscando indicios que le permitieran suponer que había llegado a algunas islas situadas no muy lejos de las costas de Asia.

En segundo lugar, los nativos encontrados por Colón podían ser hombres o mujeres de algún otro tipo familiar (tal vez europeos o bien africanos), en cuyo caso no habría alcanzado las Indias, sino algún rincón del mundo hasta entonces no conocido. El relato de Colón descarta desde el primer momento esta posibilidad. Igualmente insatisfactoria era la tercera hipótesis, la de haberse encontrado una raza humana absolutamente desconocida, pobladora de





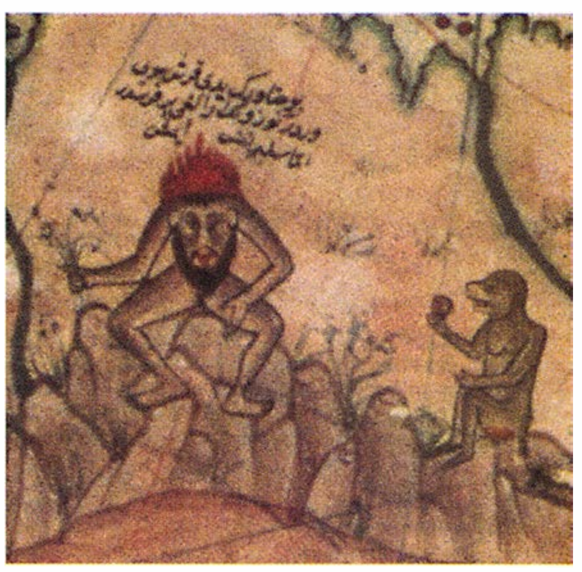




2. LOS MONSTRUOS HUMANOIDES han sido asociados con las más remotas regiones del mundo. La edición de 1493 de la *Crónica de Nuremberg*, de Hartmann Schedel, reproduce muchos de estos monstruos: esciópodos (*arriba, izquierda*), cinocéfalos (*izquierda, en medio*), blemios (*abajo, izquierda*), cíclopes (*abajo, centro*) y panotios (*abajo, derecha*).







3. MAPA DEL NUEVO MUNDO, hecho por el cartógrafo turco Piri Rei's en 1513 (*izquierda*). Incorpora información tomada de Colón. Rei's identifica Sudamérica como país de monstruos, tales como cinocéfalos (*detalle, arriba a la derecha*) y blemios (*detalle, abajo a la derecha*). Rei's lo hizo desafiando la prohibición islámica de representar imágenes de seres vivos.

una tierra de la que jamás se había oído hablar. Su reticencia a admitir semejante eventualidad aparece bien documentada en su relato.

Una cuarta perspectiva era la de que los nuevos pueblos descubiertos fuesen habitantes de un paraíso terrenal. Una de las imágenes de la Biblia más persistentes era la relativa al Jardín del Edén, donde la primera pareja humana, inocente en su desnudez, había habitado en un idílico estado natural. Colón pudo muy bien haber pensado en esta imagen cuando se encontró, no sin sorpresa, ante la desnudez de los indígenas. Los escritores posteriores llegaron mucho más lejos que él a la hora de describir paralelos entre el Edén y el Nuevo Mundo.

La última posibilidad que Colón tenía en cuenta era la de que había alcanzado alguna de las partes más distantes y prohibidas del mundo, en las que vivían sólo monstruos. Relatos o leyendas sobre monstruos humanoides fueron un tópico común de la literatura de viajes, que no podía menos que resultar conocida y familiar a Colón. Realmente, este aspecto acapararía una buena parte de los escritos colombinos.

Los monstruos míticos de que Colón había oído hablar eran gigantes, cíclopes de un solo ojo, hombres y mujeres de larguísimas cabelleras, y otros tipos de exóticas criaturas. Las amazonas eran mujeres guerreras que se amputaban el pecho derecho para usar con más eficacia los arcos y flechas. Los antropófagos devoraban carne humana y usaban para beber los cráneos de sus víctimas. Los blemios tenían la cabeza en el pecho. Los panotios estaban envueltos en gigantescas orejas, que utilizaban como mantas, o como alas para volar. Los cinocéfalos tenían cuerpo humano, pero cabeza de perro. Los esciópodos tenían una sola pierna y un enorme pie: podían tumbarse de espaldas y utilizar su pie como sombrilla.

En muchos relatos y obras literarias aparecen referencias sobre semejantes seres. Por ejemplo, la pretendida correspondencia de Alejandro Magno y la *Historia Natural* de Plinio el Viejo contienen las primeras descripciones de monstruos humanoides. El *Millione* de Marco Polo incluye también descripciones de razas monstruosas. Cualquiera que hubiese leído algo sobre lugares remotos podía esperar encontrar en ellos tales criaturas. Las referencias sobre monstruos se hicieron más frecuentes en libros eruditos del siglo XV, tales como la *Imago Mundi* de Pedro de Ailly, o la Historia *Rerum Ubique Gestarum* de Eneas Silvio Picolomini, ambos leídos por Colón.

Los mapas medievales proporcionaban expresión gráfica a las ideas concernientes a esos extraños seres que aparecían en la literatura. La Tierra de los cartógrafos medievales incluía terroríficos contornos de costas encantadas habitados por horripilantes criaturas. El mapamundi Hereford, trazado a finales del siglo XIII, representa esciópodos, blemios y otros monstruos residentes en los lugares más remotos. Otros



4. LA EXISTENCIA DE AMAZONAS GUERRERAS fue supuesta por muchos exploradores del Nuevo Mundo. André Thevet, en su *Cosmografía Universal* de 1575, ilustra la naturaleza bárbara de tales guerreras indígenas en la representación de una imaginaria batalla en el continente americano. Thevet escribe que, a diferencia de otros pueblos, los indios americanos nunca hacen la paz.

mapas, tanto anteriores como posteriores, ofrecían similares representaciones visuales. Los monstruos eran, a un tiempo, motivo de temor y de expectación para los navegantes.

Colón transcribió y resumió la información sobre monstruos que encontró en la *Imago Mundi*, indicando los pasajes que le parecieron más significativos. En una apostilla al capítulo 12, Colón escribe que "por estos dos extremos [hacia el Norte y hacia el Sur] hay salvajes que devoran carne humana; tienen caras miserables y horribles. La causa es lo destemplado del clima. Por esto tienen malos hábitos y son salvajes". Y al margen del capítulo 16, titulado *Las maravillas de la India*, Colón anota lo que esperaba ver en aquella tierra: pigmeos, gigantes macrobianos, bárbaros que matan a sus parientes más viejos y se los comen, mujeres que dan a luz una sola vez, y tienen hijos con los cabellos blancos, que se van haciendo oscuros conforme envejecen, a la manera de los colores del río Ganges, donde De Ailly localiza el pueblo que vive del olor de cierto fruto.

Cuando Colón alcanzó el Nuevo Mundo, inquirió una y otra vez sobre la presencia de monstruos humanoides. Tal vez sus informantes no entendieron lo que les estaba preguntando, o tal vez intentaron complacerlo contándole lo que al parecer quería oír. Por ejemplo, afirma en su carta haber recibido información sobre unos hombres con cola, gentes que no tenían cabello, o mujeres que vivían en una isla vacía de varones.

Estas patrañas, a las que el descubridor prestó atención, y la manera en que él las interpretó, reflejan tanto sus expectativas como sus deseos. La deficiente comunicación entre Colón y los indios —basada muchas veces sólo en unas pocas palabras, y en un lenguaje por gestos— le condujo a considerables desviaciones a la hora de traducir lo que le contaban los indígenas a su propio esquema conceptual. Sus actitudes vacilantes hacia aquellas historias expresaban tanto su necesidad de considerar seriamente la existencia de monstruos, como su deseo, por razones prácticas, de no tropezarse con ellos.

Estando en Cuba, el 4 de noviembre, uno de los indios que habían subido a bordo se refirió a un lugar donde "había hombres con un solo ojo, y otros con hocico de perro, que comen carne humana". Colón observó después que los indios que había tomado consigo temían a un pueblo que habitaba en Bohío (La Española), seres que "tenían un solo ojo en sus caras, y otros que llamaban caníbales". La palabra *caníbal* fue así introducida en el lenguaje occidental. Colón juzgaba en esta ocasión que sus informadores estaban mintiendo: pensaba que las gentes a las que ellos temían "deben ser de los señoríos del Gran Khan". Su tendencia a pensar que se encontraba cerca de Asia prevaleció sobre su inclinación a aceptar la realidad de los monstruos. En este sentido, Colón pone de manifiesto una fascinante mescolanza entre lo que él realmente oyó, lo que esperaba y lo que temía encontrar.

En su carta a Santángel, Colón se sintió obligado a referir las informaciones sobre monstruos, para desecharlas enseguida como un mero rumor. "En estas islas hasta aquí no he hallado hombres monstrudos, como muchos pensaban, mas antes es toda gente de muy lindo acatamiento...", escribe. Y añade: "así que de monstruos no he hallado ni noticia, salvo una isla que es Carib..., que es poblada de una gente que tienen en todas las islas por muy feroces, los cuales comen carne humana." Para demostrar a Fernando e Isabel, y a los europeos en general, que él no había viajado a países habitados por monstruos, Colón hizo traer a España unos cuantos indios, de modo que todos pudiesen ver que sus cuerpos estaban bien conformados.

Colón también subrayaba en sus relatos que los habitantes de las islas que visitó eran mansos y sumisos. No podemos aportar conclusiones seguras sobre el exacto pensamiento de Colón en este punto, pero sí tomar nota de algunos de sus testimonios que pudieran resultar significativos. Por supuesto, él vivió en una época en que no existía aún una idea general, como la que hoy podemos tener, sobre la libertad y la dignidad humana. No podía menos que estar de acuerdo con la mentalidad de su tiempo; su primera idea al encontrarse con un grupo de gentes primitivas fue la de esclavizarlas. Aludía una y otra vez a la docilidad de los taínos: "ellos no portan armas y no saben defenderse", escribía en su relación a los Reyes, porque "son muy cobardes, que mil no resistirían a tres [españoles armados], y así son buenos para les mandar y les hacer trabajar y sembrar, y hacer todo lo que fuere menester...".

Tales intenciones disgustaron a Las Casas, el cual escribiría más tarde que "la natural simpleza, carácter dócil y humilde condición de los indios, así como la necesidad que sentían de protección, dio a los españoles la insolencia de tenerlos en poco, e imponerles trabajos más arduos

que los que ellos podían soportar, y llegaron a desesperarlos con la opresión y la destrucción...". "El Almirante se excedió en la palabra más de lo que debía, y lo que él concibió y dejó salir de sus labios fue el comienzo y motivo de los abusos que más tarde se cometieron con ellos." Evidentemente, la capacidad para llevar a cabo con éxito una expedición no implica necesariamente nobleza de carácter.

En la mayoría de las ocasiones, sin embargo, las observaciones de Colón sobre los nativos estaban relacionadas con su esfuerzo por averiguar a qué parte del mundo había ido a parar. Describió con detalle las características físicas de los indígenas con el fin de probar que no eran deformes, si bien se diferenciaban en su apariencia de los pueblos conocidos, tanto europeos como africanos. Después de su primer encuentro con los nativos de Guanahaní, el 12 de octubre, Colón describió que estaban "muy bien hechos, de muy hermosos cuerpos y muy buenas caras", aunque observó que tenían "los cabellos gruesos cuasi como colas de caballos, e cortos". Y seguía observando: "los cabellos traen por encima de las cejas, salvo muy pocos que los traen largos por detrás, que jamás cortan".

Colón notaba que tenían "las piernas muy derechas, todas a una mano, y no barriga, salvo muy bien hecha". Sus ojos eran "grandes e muy hermosos". Observó que todos eran de "frente y cabeza muy ancha, más que otra generación que hasta aquí haya visto". Sólo más tarde se dio cuenta de que esta apariencia provenía de la costumbre de los nativos de presionar con una tabla la frente de los niños. Destacó que algunos de aquellos nativos tenían sus caras pintadas, mientras otros pintaban su cuerpo entero.

En el curso del relato de su viaje, Colón tuvo igualmente ocasión de anotar acerca de aquellos indígenas que "de ellos ninguno es prieto [negro], salvo de la color de los canarios". Esta última cualidad, como tantas otras que aparecen en su relato, resultó fundamental para establecer que la isla que había descubierto no formaba parte de Africa. Y añadía: "ni se debe esperar otra cosa, pues esta isla está Este-Oeste con la de Fierro, en Canaria", en referencia sin duda a la teoría de Aristóteles de que el aspecto de los habitantes de una misma latitud es siempre parecido.

Algunos días más tarde, cuando Colón llegó a Cuba, observó que "la gente es mansa y tímida", que andaban "desnudos como los otros", y le pareció que "vivían sin armas y sin gobierno". Bien pudo insinuar una implícita comparación con el Jardín del Edén. El 6 de noviembre escribía a propósito de los indígenas: "Son gentes muy sin maldad ni de guerra", añadiendo que "no son muy negros, salvo menos que en Canarias". Parece que algunas observaciones fueron discretamente omitidas en la versión definitiva del *Diario* de Colón. Samuel Eliot Morison, uno de los principales biógrafos del Almirante, sugiere que éste se abstuvo de mencionar "cualquier tipo de expansión de los navegantes con las jóvenes indias", cuyos hábitos eran "completamente promiscuos"; sin duda porque "su *Diario* estaba destinado a ser leído por una recatada reina".

A pesar de las numerosas aseveraciones de Colón, tanto en su *Diario* como en la carta, acerca de la naturaleza de los indígenas que encontró, otros escritores continuaron llenando el Nuevo Mundo con toda clase de monstruos, como por espacio de siglos se había supuesto que habitaban en los países más remotos. En 1493, Giuliano Dati hizo una adaptación en verso de la obra de Colón, una obra muy popular que en breve tiempo agotó cuatro ediciones. Dati escribió entonces otros dos poemas, algo así como apéndices de su libro, en los cuales describe monstruos supuestamente encontrados en las Indias Orientales. El segundo libro presentaba incluso grabados en madera que intentan reproducir ocho de estas criaturas humanoides.

La fuerza de la tradición popular aparece reflejada también en un famoso mapa de América realizado en 1513 por Piri Rei's, un cartógrafo turco que escribió acerca de los descubrimientos de Colón. El mapa delinea la costa oriental de Sudamérica con un sorprendente grado de precisión. Sobre la parte que representa





5. EN LAS LEYENDAS OCCIDENTALES aparece señaladamente el canibalismo que se practica en las regiones remotas del globo. El grabado en madera de Hans Staden (1557) ilustra (*arriba*) sus pretendidas experiencias en América. En 1592, Theodore de Bry reprodujo el grabado de Staden en una imagen más refinada (*derecha*). En su obra, dio a las figuras una incongruente apariencia europea "clásica".



6. LA REPRESENTACION AMABLE de la vida en América comenzó a aparecer a fines del siglo XVI. Theodore de Bry inspiró esta ilustración de hacia 1590 en una acuarela hecha por John White, donde aparecen indígenas virginianos. Además de la percepción de los detalles de la apacible vida de estos nativos, De Bry evidencia un notable interés por la fauna y la flora locales.

la tierra, el mapa contiene dibujos de varios seres reales, como papagayos y monos; pero también incluye un unicornio, un hombre con cabeza de perro e incluso un humanoide con la cabeza bajo los hombros.

Otros exploradores siguieron manteniendo serias suposiciones sobre monstruos que poblaban el Nuevo Mundo. En 1518, Diego Velázquez de Cuéllar, gobernador de Cuba, encargó expresamente a Hernán Cortés que buscase hombres con orejas gigantes y cabeza de perro. En 1522, el propio Hernán Cortés envió al emperador Carlos V una serie de grandes huesos fósiles, que suponía esqueletos de hombres gigantescos. Francisco de Orellana dio nombre al río Amazonas, pensando que corría por una región poblada por mujeres guerreras que se cortaban el pecho: de acuerdo, por tanto, con las descritas por las viejas leyendas. Sospecho que confundió a guerreros varones, que llevaban adornos de plumas en la cabeza, con mujeres, y por tanto con amazonas.

Aunque Colón no encontró monstruos, dio de hecho noticia de seres humanos que nunca había esperado encontrar: los "indios", que eran una raza humana distinta de todas las hasta entonces conocidas, tanto por su aspecto como por sus costumbres. La reacción de la sociedad europea ilustra la humana tendencia a buscar elementos familiares en una información no familiar; en palabras del físico J. Robert Oppenheimer, "cuando llega algo realmente nuevo, nosotros no podemos abordarlo sino sobre la base de lo familiar y de lo ya elaborado".

La Biblia suponía una cierta fuente de inspiración para la comprensión de los indígenas. Los escritos epistolarios de la época que comentan la expedición colombina citan con frecuencia la desnudez de los indios, añadiendo varios detalles sobre el uso de alguna hoja o trozo de tela para ocultar los genitales. Morison resalta que "un rasgo de naturalidad incitaba a todos los relatos a resaltar aquella desnudez, que era total, excepto en lo referente a la hoja con que se cubrían las mujeres". Y observa que "los aspectos que más interesaban a la gente acerca de los descubrimientos de Colón eran los referentes a algo tan viejo como el recuerdo de Adán y Eva en el Jardín del Edén". Morison nota también que "la falta de religión entre los nativos, su naturaleza tímida y generosa, y su desconocimiento de armas mortíferas" fueron características que, "combinadas con su primitiva inocencia, sugerían a una persona con un mínimo de educación clásica que la Edad Dorada todavía subsistía en los más remotos confines del globo". Morison establece aquí explícitamente lo que en los relatos de Colón había desaparecido de una manera implícita.

La insistencia de Colón en que los pobladores del Nuevo Mundo estaban perfectamente conformados como hermosos seres humanos, tuvo una interesante consecuencia. Las representaciones artísticas de los nativos americanos hechas por la siguiente generación de exploradores sublimaron aquella perfección de la forma, transformándola en un verdadero tópico, en lugar de matizarla o negarla. El resultado fue que los artistas de los siglos XVI y XVII pintaban a los indígenas como si cada uno de ellos fuese un atleta griego posando para el escultor Fidias. Cuando menos en este sentido, el Paraíso Terrenal se encontraba allí.

La cuestión sobre la similar o no similar naturaleza entre los europeos —esto es, los españoles— y los originarios del Nuevo Mundo se convirtió en el tema central de la polémica acerca de cómo introducir a aquellos hombres en el mundo cristiano. Las Casas insistía en que los indios eran seres humanos iguales a nosotros, y que por tanto debían ser tratados con tolerancia y afabilidad, conduciéndolos a una pacífica conversión al cristianismo. Juan Ginés de Sepúlveda, canónigo de Salamanca y cronista real, respondía que incluso aunque tales criaturas fueran "más hombres que bestias" —de lo cual él no estaba totalmente seguro—, quedaba fuera de cuestión que se trataba de gentes de una condición inferior. Lógico era, por tanto, pensaba, que sirviesen a los españoles y fuesen cristianizados por la fuerza.

La misma naturaleza de los españoles, seguía razonando Sepúlveda, justificaba el sometimiento de los indios por aquéllos, tal como lo habían hecho los griegos con los bárbaros. Para él, los indios daban muestras de "cierta suerte de intemperancia y malas inclinaciones", incluido el canibalismo. Las virtudes de los españoles eran "prudencia, talento, magnanimidad, templanza, humanidad y religión": cualidades que podrían parecer paradójicas, dado el trato que muchas veces dieron a los indios los conquistadores españoles.

Las actitudes hacia la cultura de los indios fueron también muy variadas. Los exploradores españoles del siglo XVI José de Acosta y Gonzalo Fernández de Oviedo y Valdés eran partidarios de acoger con comprensión y simpatía las costumbres, usos y organización social de los nativos. Pero al mismo tiempo, Diego de Landa consideraba algunos de los hábitos de los mayas tan salvajes y repulsivos, que destruyó los documentos que recordaban su civilización.

Tan divergentes interpretaciones sobre los pueblos del Nuevo Mundo no deben ser para nosotros una sorpresa. Los filósofos de la ciencia han demostrado que hasta los hechos científicos más ostensibles se hallan muy sesgados por la teoría. La historia de la ciencia muestra que el peso de la teoría en la interpretación de los experimentos y las observaciones presenta ejemplos muy parecidos a los prejuicios sobre los nativos del Nuevo Mundo que mostraron Colón y muchos de sus coetáneos.

Colón esperaba descubrir los reinos del Gran Khan, y hasta su muerte siguió creyendo fervientemente que lo había logrado. Supo que podía encontrar monstruos, y las historias que oyó coincidían con sus expectativas. Incluso cuando comenzó a aprender algo sobre las creencias y costumbres de los indígenas, Colón sobrepuso sus prejuicios y sus deseos sobre lo que percibían sus ojos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EL ALMIRANTE DEL MAR OCÉANO. VIDA DE CRISTÓBAL COLÓN. Samuel Eliot Morison, Buenos Aires, Emecé, 1945.

THE MONSTROUS RACES IN MEDIEVAL ART AND THOUGHT. John B. Friedman, Harvard University Press, 1981.

CRISTÓBAL COLÓN, TEXTOS Y DOCUMENTOS COMPLETOS. Prólogo y notas de Consuelo Varela. Madrid; Alianza, 1984.

MARVELOUS POSSESSIONS: THE WONDER OF THE NEW WORLD. Stephen Greenblat, University of Chicago Press, 1991.

La voz humana

La fisiología de la voz no empezó a conocerse bien hasta el advenimiento de técnicas innovadoras, gracias a las cuales contamos, además, con una mejor atención y tratamiento de ese recurso humano

Robert T. Sataloff

Veinte años atrás, la voz humana constituía todavía un misterio. Se conocía muy mal su fisiología y no se sabía cómo cuidarla, pese a siglos de fascinación de la sociedad ante las demostraciones excepcionales de cantantes y actores, por no recordar la importancia decisiva de la comunicación oral entre 'los hombres. Los estudios sobre la voz y, en particular, sobre el cuidado de la voz profesional eran escasos; además, en la exigua bibliografía existente apenas si se abordaba la fisiología de la voz.

Magra era también la situación de la terapéutica. Se cuestionaban los tratamientos extraquirúrgicos de los problemas benignos sufridos por las cuerdas vocales, por cuya razón se solía extirpar las capas superficiales de la cuerda vocal para eliminar procesos patológicos benignos, dando por supuesto que un tejido sano neoformado repararía la extirpación, pero el resultado eran ronqueras permanentes.

En esa época aparece una nueva especialidad médica. Espoleados por el interés en los problemas de la voz de cantantes y actores, los avances científicos y técnicos elevaron el nivel de atención a todos los que tenían complicaciones en la voz. En ese paso hacia delante intervinieron profesionales de origen dispar, que hablaban, a primera vista, lenguajes muy distintos. La Fundación para el Estudio de la Voz, instituida por el médico neoyorquino Wilbur James Gould para fomentar esa convergencia, celebró su primer simposio en 1972; participaron en el mismo laringólogos, patólogos, fisiólogos, maestros de canto y otros profesionales del canto y del teatro. Del intercambio de ideas allí ocurrido salieron nuevos proyectos conjuntos de investigación, nuevas colaboraciones y notables progresos.

Transcurridos veinte años, pueden recibir ya una esmerada atención médica y terapéutica el cantante con problemas, el político en período electoral, el fumador afónico o el vendedor de voz fatigada. Asistencia que es resultado del conocimiento cada vez mayor que se va adquiriendo de la fisiología de la voz.

La emisión de la voz se debe a la acción coordinada de muchos músculos, órganos y otras estructuras del abdomen, tórax, cuello y cara. En realidad, casi todo el cuerpo influye en la voz, directa o indirectamente. Para hacernos una idea de la patología del órgano vocal, se impone un breve viaje por este complejo y delicado mecanismo. La primera estación, y la parte más conocida, es la laringe u órgano de la voz.

La laringe consta de cuatro componentes anatómicos básicos: el esqueleto cartilaginoso, los músculos intrínsecos, los músculos extrínsecos y la mucosa o capa blanda. Las partes principales del esqueleto laríngeo son el cartílago tiroides, el cartílago cricoides y los dos cartílagos aritenoides. Los músculos extrínsecos conectan estos cartílagos a otras estructuras del cuello; los músculos intrínsecos se alojan dentro de los mismos cartílagos.

Un par de músculos intrínsecos se extiende desde los cartílagos aritenoides hasta el ángulo del cartílago tiroides, justo debajo y detrás de la nuez de Adán. Estos músculos tiroaritenoideos forman la masa de las cuerdas vocales; el espacio entre ellas es la glotis. En las cuerdas vocales se halla normalmente el origen de la voz humana.

Los músculos intrínsecos pueden cambiar las posiciones relativas de los cartílagos y tirar de ellos a través de una gama de movimientos. Estos cambios alteran la forma, posición y tensión de las cuerdas vocales suspendidas. El músculo cricotiroideo, por ejemplo, participa en el control de la agudeza de tono al reforzar la tensión longitudinal (estiramiento) de las cuerdas vocales.

Los músculos extrínsecos suben y bajan el esqueleto laríngeo. El efecto de acordeón resultante cambia los ángulos y distancias entre los cartílagos y altera la longitud en reposo de los músculos intrínsecos. La laringe presenta una tendencia natural a subir y bajar a medida que el tono de voz asciende y desciende. Tales ajustes de posición, muy grandes, dificultan el control adecuado sobre las cuerdas vocales que se requiere en la voz normal. Por esta razón, los cantantes de piezas clásicas que han educado su voz aprenden a usar los músculos extrínsecos para mantener el esqueleto laríngeo a una altura constante, sin tener en cuenta la agudeza de la voz. Esta técnica proporciona una calidad vocal uniforme en toda la gama del cantante.

Los delicados tejidos que recubren el interior de la laringe son muy complejos. La mucosa forma la superficie, delgada y lubricada, de las cuerdas vocales; las pone en contacto cuando se cierran. La mucosa que tapiza las cuerdas vocales difiere de la que reviste el resto de la laringe y el tracto respiratorio: se trata de un epitelio escamoso y estratificado,

ROBERT T. SATALOFF, profesor de otorrinolaringología en la facultad de medicina de la Universidad Thomas Jefferson de Philadelphia, dirige *The Journal of Voice*. Pertenece al coro universitario y enseña canto. Ha publicado más de 150 artículos científicos y una decena de libros sobre su especialidad.

1. LA CIRUGIA de las cuerdas vocales prolongó la carrera de Elton John. Tuvo problemas con su voz durante una gira por los Estados Unidos en 1986. Padecía una lesión benigna, extirpada con éxito a principios de 1987. Un año después reanudaba sus conciertos.

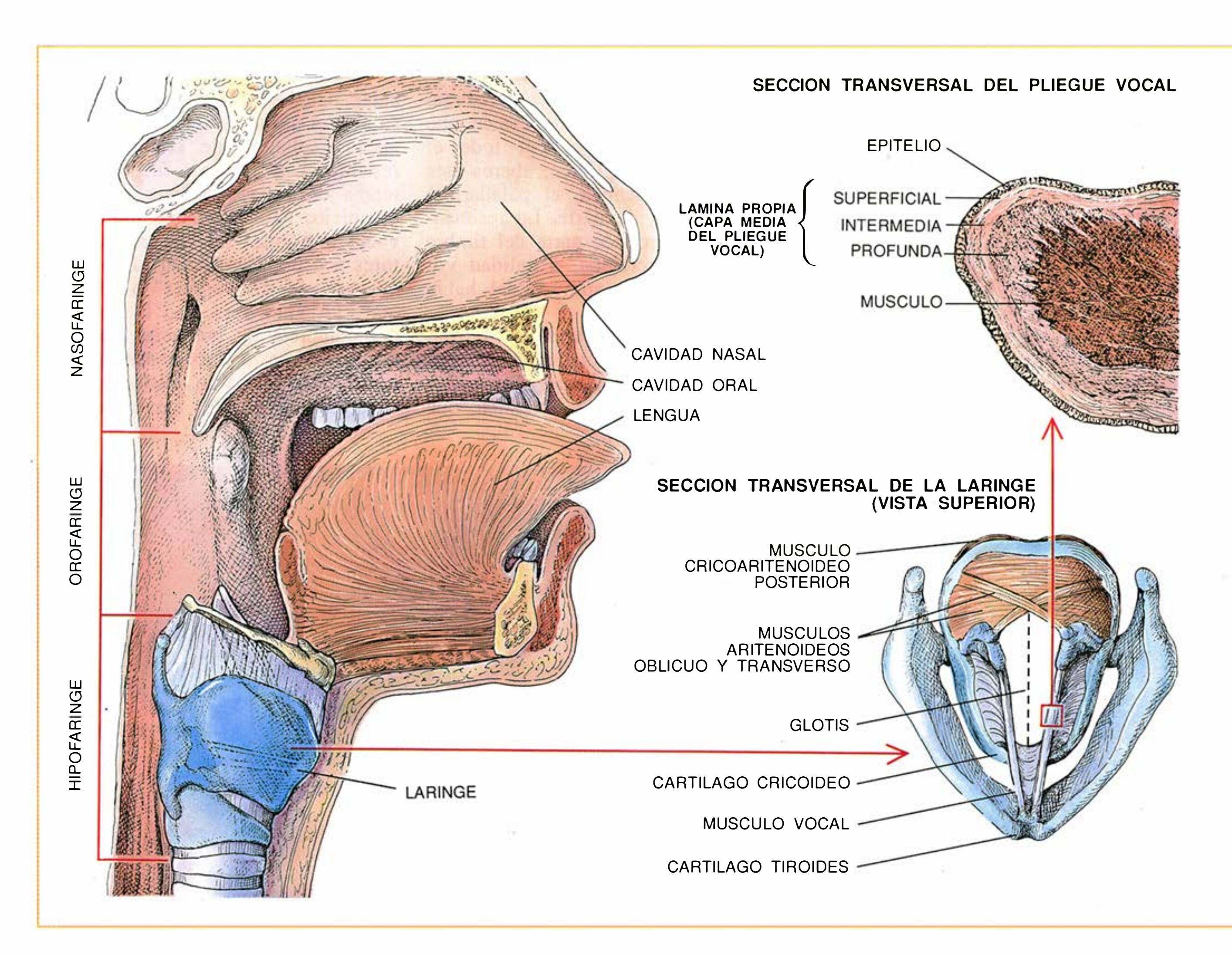
idóneo para soportar el trauma del contacto de las cuerdas vocales.

Pero no pensemos que la cuerda vocal sea un simple músculo protegido por una mucosa. En 1975 Minoru Hirano, médico de Kurume, reconoció cinco capas distintas de tejido en la estructura. Debajo del epitelio delgado y lubricado de la superficie, se hallan las capas superficial, intermedia y profunda de la "lamina propria"; bajo esta última yace el músculo tiroaritenoideo o vocal. Las cinco capas poseen diferentes propiedades mecánicas que producen los suaves movimientos de corte, esenciales para las vibraciones normales de las cuerdas.

Cuando las cuerdas vocales vibran, producen sólo un sonido básico que resuena, sin embargo, por todo el tracto vocal supraglótico; abarca éste la faringe, la lengua, el paladar, la cavidad oral y la nariz. La resonancia añadida produce parte del timbre y carácter percibidos, o calidad vocal, de todos los sonidos del habla y el canto.

La fuente de potencia de la voz reside en el tracto vocal infraglótico —los pulmones, caja torácica y músculos de la espalda, tórax y abdomen, que generan y dirigen una corriente de aire controlada entre las cuerdas vocales. Conforme la glotis se cierra, se abre y altera su forma, cambia sin apenas solución de continuidad su resistencia al aire. La fuente de potencia debe hacer ajustes rápidos y complejos para mantener una calidad vocal uniforme. Los cantantes y actores acostumbran llamar al complejo de potencia su "soporte" o "diafragma". La verdad es que la anatomía del complejo de potencia, complicada, no acaba de conocerse bien ni suelen referirse a lo mismo quienes echan mano de tales expresiones.





Los principales músculos de la inspiración son el diafragma (músculo en forma de cúpula, que se extiende a lo largo del fondo de la caja torácica) y los músculos intercostales externos. La espiración es una función pasiva durante la respiración tranquila: las propiedades mecánicas de los pulmones y caja torácica expulsan el aire fuera de los pulmones sin esfuerzo después de una respiración plena. Cabe también una espiración activa, y muchos de los músculos que engloban este proceso se usan para apoyar la producción de voz o fonación.

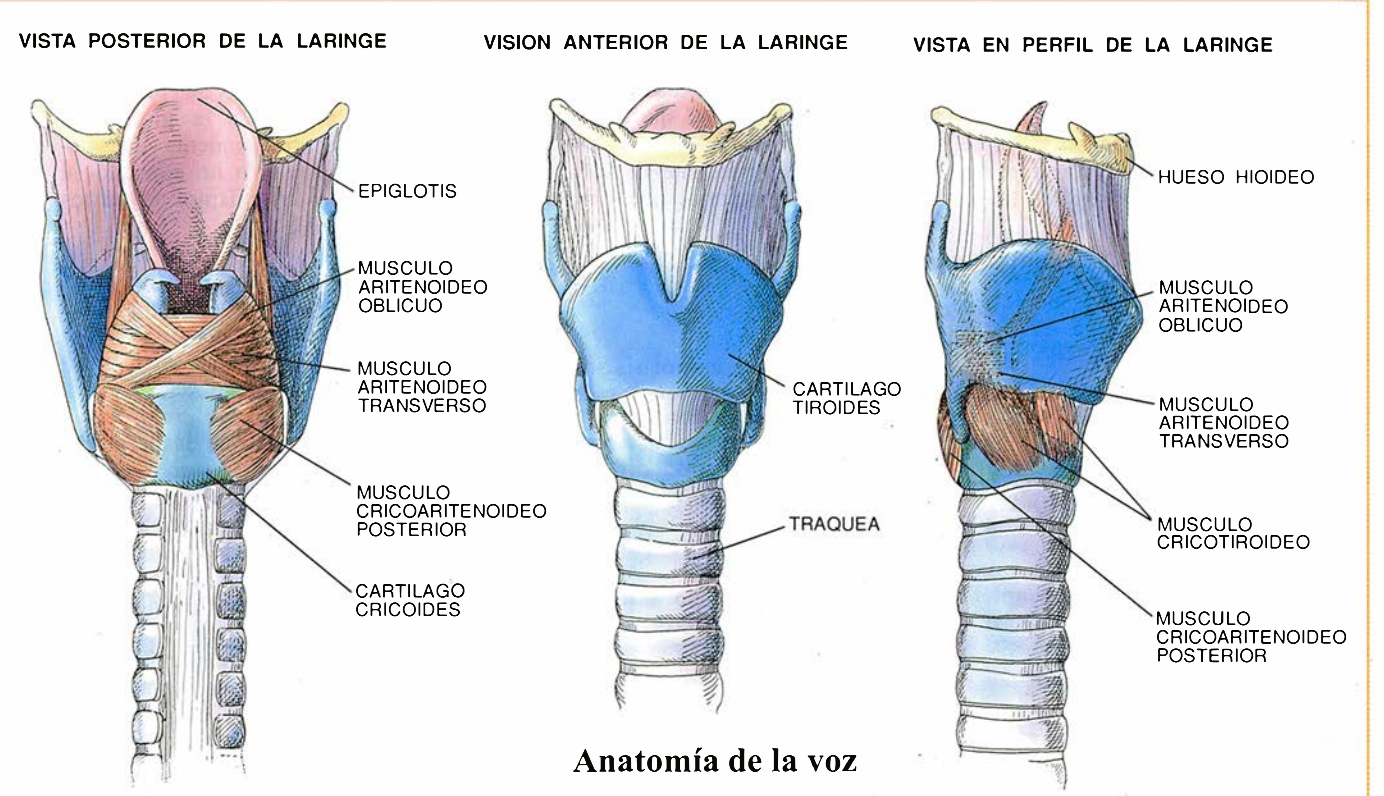
Durante la espiración activa, los músculos pueden aumentar la presión dentro del abdomen y, por tanto, forzar el diafragma hacia arriba; o bien pueden bajar las costillas y el esternón para reducir las dimensiones del tórax. Los músculos principales de la espiración son los abdominales pero también contribuyen los músculos intercostales internos y otros músculos del tórax y espalda.

Un traumatismo o cirugía que altere la estructura o funcionamiento de estos músculos reduce la fuente de potencia de la voz; lo mismo se diga del asma y otras enfermedades que hacen irregular la espiración. La gente suele compensar las deficiencias registradas en el mecanismo de apoyo sobrecargando de trabajo a los músculos laríngeos, que no están diseñados para servir de fuente de potencia vocal. De esa conducta se resiente la función, amén de causar fatiga rápida, dolor e incluso problemas estructurales, como nódulos en las cuerdas vocales.

Igual que el sistema muscular y el esquelético, también el sistema nervioso interviene en la emisión de la voz. La "idea" de un sonido de voz se origina en la corteza cerebral y viaja a los núcleos motores del tronco cerebral y espina dorsal. Estas áreas envían complicados mensajes para coordinar las actividades de la laringe, la musculatura tóracica y abdominal y las articulaciones del tracto vocal. Las señales procedentes del tracto extrapiramidal y del sistema nervioso autónomo participan, a su vez, en esas operaciones.

Los nervios que controlan los músculos del tracto vocal pueden convertirse en fuentes de problemas. Los dos laríngeos recurrentes, que gobiernan la mayoría de los músculos intrínsecos de la laringe, van, el nervio izquierdo sobre todo, a través del cuello hasta el tórax y retornan después hacia la laringe; se lesionan, pues, fácilmente por golpes o por cirugía del cuello y tórax.

Los nervios aportan también información al cerebro sobre la emisión de voz. La información auditiva que se transmite desde el oído a través del tronco cerebral hasta la corteza permite que el emisor ajuste el sonido producido con el deseado. La información táctil procedente del cuello y los músculos ayuda también al afinamiento de la emisión, si bien no acaba de entenderse del todo cómo se desarrolla este proceso. Los cantantes y oradores que han educado su voz aprovechan el adiestramiento para sacarle el máximo partido a la información táctil, pues son conscientes de que unas condiciones acústicas deficientes, unos instrumentos musicales chillones y los ruidos



Anatomía de la voz

El mecanismo vocal abarca músculos y órganos del abdomen, pecho, garganta y cabeza. El dibujo de la izquierda muestra los músculos de la garganta y de la cabeza. A su derecha se ofrecen algunos detalles relativos a la laringe, o caja de voz, en una orientación vertical de la estructura con la región frontal —nuez de Adán— mirando hacia abajo. Los dos músculos vocales constituyen los cuerpos de las cuerdas; encima de la representación de la laringe aparece un corte transversal de un pliegue. Los tres dibujos restantes (*arriba*) ilustran los principales músculos y cartílagos laríngeos.

de la masa contrarrestran la información auditiva.

Durante la fonación, todas esas estructuras anatómicas y sistemas deben trabajar de forma coordinada. La fisiología de la emisión de voz es muy compleja, si bien podemos comparar esta última a una trompeta. La potencia del sonido se genera en el tórax, abdomen y musculatura de la espalda, que producen una corriente de aire de elevada presión. Los labios del trompetista se abren y cierran en la boquilla para crear un sonido similar al generado por las cuerdas vocales, que resuena a través del resto de la trompeta, afín al tracto vocal supraglótico.

El progreso registrado a lo largo de los últimos 20 años ha venido, en buena parte, del estudio sobre el origen y modificación de los sonidos vocales. Se ha insistido, de manera particular, en la construcción de modelos relativos a los movimientos de las cuerdas vocales. Pese a su composición anatómica en cinco capas, la cuerda se comporta, desde el punto de vista mecánico, como una estructura de 3 capas, constituida por una cubierta (epitelio y capa superficial de la "lamina propria"), una capa de transición (capas intermedia y profunda de la "lamina propria") y un cuerpo (músculo tiroaritenoideo).

La observación y el diseño de modelos han sacado a luz la forma en que la laringe produce el sonido. En un comienzo, las cuerdas están en contacto y cerrada la glotis. Cuando los pulmones expulsan aire, la presión infraglótica es de un nivel de siete centímetros de agua para una conversación normal. Esta presión empuja progresivamente las cuerdas vocales separándolas del fondo, hasta abrir la glotis y franquear el paso al aire. Hay fuerzas elásticas y de otro tipo que se oponen a la separación del margen superior de las cuerdas vocales, pero no pueden vencer la potencia de la corriente de aire.

El flujo de éste produce el efecto de Bernoulli: una caída de la presión lateral del aire causada por el movimiento hacia delante. El efecto tiende a mantener cerradas las cuerdas vocales, en el mismo sentido que las propiedades elásticas de los tejidos. La presión infraglótica de la corriente de aire también disminuye a medida que la glotis se abre y deja salir el aire.

Por culpa de esos factores, los bordes inferiores de las cuerdas vocales empiezan a cerrarse casi inmediatamente, aun cuando sigan separados los bordes superiores. El cierre relaja todavía más la fuerza de la corriente de aire. Los bordes superiores de las cuerdas vocales se juntan otra vez en la línea media y ocluyen la glotis. De nuevo, empieza a formarse la presión infraglótica; y se itera el proceso. (Entiéndase que existe presión directa y que las variaciones alternantes raramente dejan caer hasta cero la presión infraglótica. Dato éste que reviste su interés a la hora de explicar las fuerzas dominantes implicadas en los movimientos de las cuerdas vocales.)

Hay un punto a destacar en el proceso: la parte inferior de las cuerdas vocales empieza a abrirse y cerrarse antes que la superior. El desplazamiento ondulatorio del revestimiento de la cuerda vocal produce un movimiento ondulatorio en la capa mu-

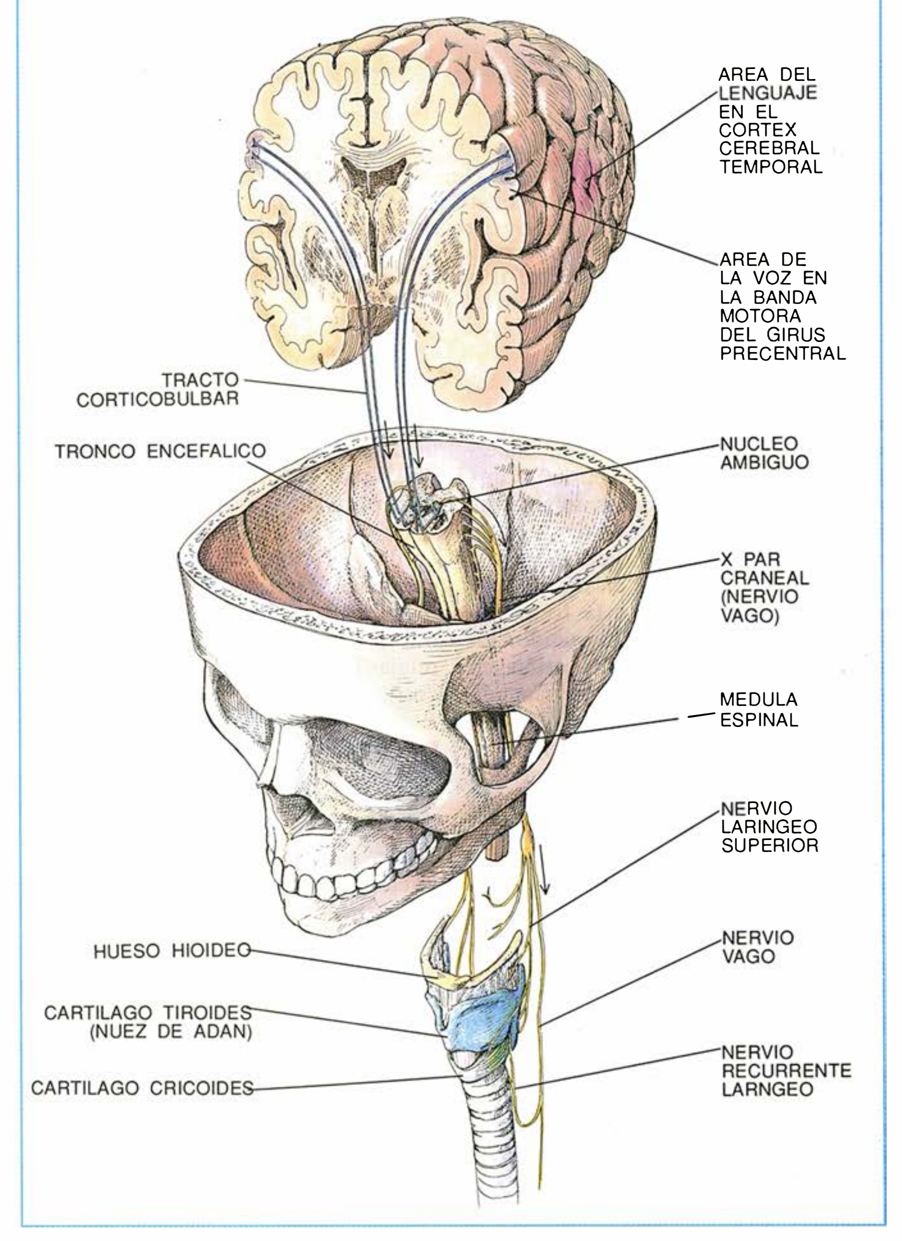
cosa. Si la compleja vibración de la onda de la glotis yerra, se puede producir ronquera y otras alteraciones de la calidad de la voz.

Las cuerdas vocales, a diferencia de las del violín, no hacen vibrar el aire. Se crean, en cambio, remolinos de aire en el tracto vócal a través de la apertura y cierre de la glotis. La interrupción repentina del flujo de aire al final de cada chorro produce una vibración acústica. El mecanismo es similar al que provoca el sonido de una palmada.

El sonido procedente de la laringe es un tono complejo, que consta de una frecuencia o tono fundamental y tonos suplementarios o armónicos más altos (la frecuencia está medida en hertz, el número de ciclos de apertura y cierre en la glotis por segundo). Por sorprendente que parezca, todos, hayan o no educado su voz, producen los mismos espectros de cuerda vocal.

Así nace la voz

El habla y el canto, o incluso la emisión de un mero sonido vocálico, entraña una compleja orquestación de acciones mentales y físicas. La idea de producir un sonido se origina en la corteza cerebral —en el área del lenguaje. El movimiento de la laringe, controlado por esta área, se transmite a la laringe por diferentes nervios. En cumplimiento de ello, las cuerdas vocales vibran y generan un zumbido. La resonancia de este sonido por toda el área del tracto vocal epiglótico —donde se inscriben la faringe, la lengua, el paladar, la cavidad oral y la nariz—, confiere al sonido las cualidades percibidas por el oyente. Merced a la autoescucha y la sensibilidad táctil, el orador o intérprete irán afinando su tono de voz.



La faringe (región de la garganta entre la boca y el esófago), la cavidad oral y la cavidad nasal actúan como una serie de resonadores interconectados en la señal acústica. El sistema presenta mayor complejidad que la trompeta porque las paredes, y por tanto su forma, son flexibles. En cada resonador, unas frecuencias se atenúan y otras se refuerzan, o se emiten con amplitudes más altas. Así, ciertos armónicos se suavizan, en tanto que otros se tornan más altos. Johan Sundberg y Gunnar Fant, del Instituto Real de Tecnología de Estocolmo, han demostrado que, en los cantantes el primero y en los oradores el segundo, el tracto vocal tiene 4 o 5 formantes, frecuencias de resonancia notables. La intensidad de la potencia de voz disminuye uniformemente a través de su espectro de frecuencia, excepto en las frecuencias de los formantes, donde alcanza su máximo.

Las frecuencias de los formantes vienen establecidas por la morfología del tracto vocal; pueden alterarlo las cavidades musculares laríngea, faríngea y oral. La longitud y forma del tracto vocal son peculiares de cada individuo y están determinadas por la edad y el sexo: las mujeres y los niños, con un tracto vocal más corto que los hombres, poseen en consecuencia frecuencias de los formantes más altas. Lo cual no empece que podamos ajustar, de forma voluntaria y hasta cierto punto, las dimensiones del tracto vocal; el dominio de esos ajustes resulta decisivo para educar la voz.

La frecuencia resonante que ha recibido justa atención es el formante del cantante. Se le atribuye la responsabilidad sobre el timbre de la voz de los profesionales. La habilidad para lograr dejarse oír con nitidez, por encima incluso de una orquesta, depende en principio de la frecuencia del formante: en lo concerniente a la intensidad vocal máxima, apenas si existe diferencia, si es que la hay, entre quienes han educado su voz y quienes no han seguido ese entrenamiento.

Los formantes se dan en torno a los 2300 o 3000 hertz para todos los sonidos vocálicos. Aparte de añadir

claridad y proyección a la voz, contribuyen también a las diferencias de timbre. Los formantes del cantante se presentan, en los bajos, alrededor de 2400 hertz; en los barítonos, en torno a los 2600 hertz; en los tenores, a 2800 hertz; en mezzosopranos, a 2900 hertz, y, en sopranos altos, a 3200 hertz. El formante del cantante es mucho menos pronunciado en los sopranos.

El control sobre la frecuencia fundamental y la intensidad resulta decisivo. Elevaremos la primera si aumentamos la presión del chorro que cursa por la laringe. A medida que sube la presión, explica la mecánica, las cuerdas vocales tienden a separarse y juntarse con mayor celeridad y frecuencia. Los cantantes aprenden a compensar esa tendencia; sin tal dominio, elevarían el tono cada vez que cantasen más alto.

La técnica más eficaz para alterar el tono de voz suele consistir en cambiar las propiedades mecánicas de las cuerdas vocales. La contracción del músculo cricotiroideo provoca que los cartílagos tiroides y cricoides giren en torno a las cuerdas y las tensen. Esa conformación sirve para exponer mayor superficie de cuerdas vocales al flujo aéreo y aumentar su sensibilidad a la presión de aire. Se tensan con ello también las fibras elásticas de las cuerdas vocales y se refuerza su eficacia vibrando juntas. El tono aumenta porque los ciclos de apertura y cierre en la glotis (ciclos fonatorios) se acortan y repiten con mayor frecuencia.

La intensidad vocal, o volumen, depende de la cuantía en que las vibraciones de la cuerda vocal exciten el aire del tracto vocal. Al elevar la presión de aire, crece la amplitud de las vibraciones porque las cuerdas vocales se distancian más y se juntan con mayor agilidad. En consecuencia, durante este ciclo fonatorio el flujo de aire que cursa por la laringe se corta con brusquedad y aumenta la intensidad del sonido producido. Un efecto similar potencia la intensidad del sonido de la palmada.

En las pautas de flujo de cada ciclo fonatorio hallamos un valioso indicador biofísico del rendimiento alcanzado por las estrategias del control vocal. Un intérprete podría pretender redoblar la intensidad de su voz reforzando desmesuradamente la presión del aire y la resistencia de la glotis al flujo del aire, con los músculos del tracto vocal infraglótico y las fuerzas aductoras de las cuerdas vocales (cierre glótico). Pero semejante combinación de fuerzas da por resultado la fonación bajo presión, condición en que la amplitud de la frecuencia fundamental de la voz es baja, no obstante el notable esfuerzo físico empeñado.

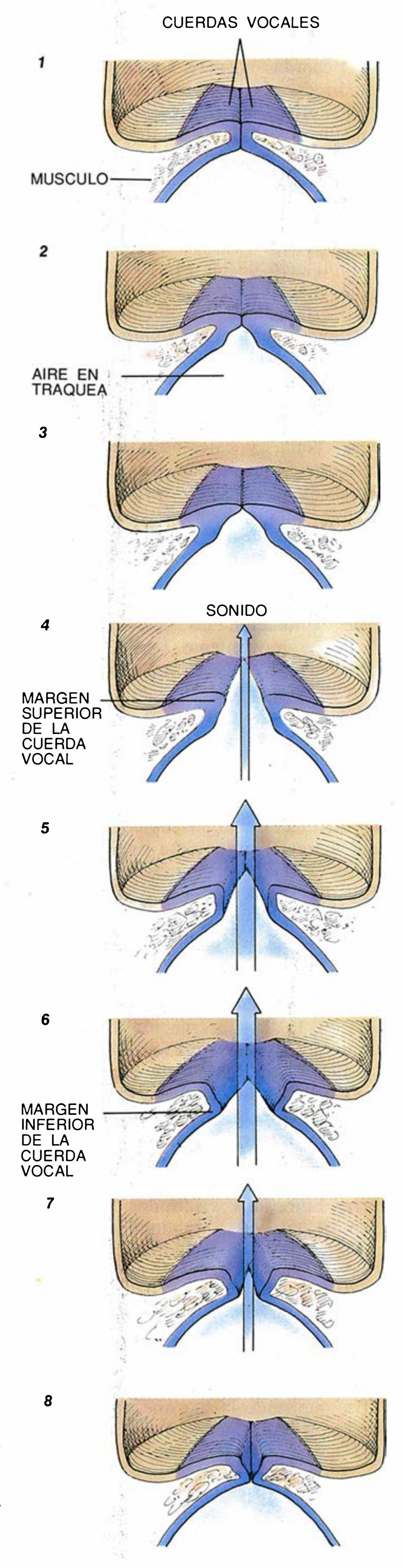
La amplitud de la fuente de voz será también baja, si por debilidad de las fuerzas aductoras las cuerdas vocales no entran en contacto y la glotis no opera debidamente: la condición en que tal fenómeno ocurre se denomina fonación respiratoria. Sin embargo, una tercera condición, la fonación de flujo, se caracteriza por la baja presión del chorro de aire y escasa fuerza aductora; ello aumenta la intensidad de la frecuencia fundamental y produce una entonación más fuerte. Para identificar la fonación bajo presión, respiratoria o de flujo, los expertos idean cambios en el flujo de aire a través de la glotis, que se recogen en un gráfico o glotograma de flujo.

Sundberg ha demostrado que el intérprete eleva la amplitud de la frecuencia fundamental en 15 decibelios o más con el tránsito de la fonación bajo presión a la fonación de flujo. Así pues, la gente que fía en la fonación bajo presión realiza un esfuerzo innecesario para aumentar el volumen de la voz. Las fuerzas y pautas de uso muscular invocadas para compensar esa deficiencia podrían dañar la laringe.

Conocidos los mecanismos de control vocal, los médicos pueden detectar y corregir los problemas de los abusos de la voz y traumatismos de las cuerdas vocales. La identificación de los diversos componentes del tracto vocal facilitan, asimismo, la creación de estrategias óptimas para rehabilitar voces dañadas.

No menos crucial para el desarrollo de la ciencia de la voz ha sido la innovación instrumental. Hasta principios del siglo XIX, los médicos sólo podían apoyarse en el oído para apreciar la calidad de la voz y su funcionamiento. No había técnicas con las que observar y mensurar las funciones de la voz.

En 1854, Manuel García, médico español y profesor de canto, descubrió la técnica de la laringoscopia indirecta. Usaba el sol como fuente



2. VIBRACION de las cuerdas vocales. Se ilustra en un corte vertical a través de la línea media de las cuerdas vocales, durante la producción de un sonido simple. Nos situamos en la laringe. Antes de empezar el proceso (*1*), las cuerdas están juntas. Se separan cuando el aire asciende a través de la tráquea (*2-7*); vuelven a juntarse en cuanto cesa el sonido (*8*).

de luz y un espejo dental colocado en la boca del estudiante para observar las cuerdas vocales. La laringoscopia indirecta se convirtió de inmediato en herramienta imprescindible de los médicos, y todavía se sigue empleando. (Aunque sustituida, obviamente, la luz solar por la eléctrica.)

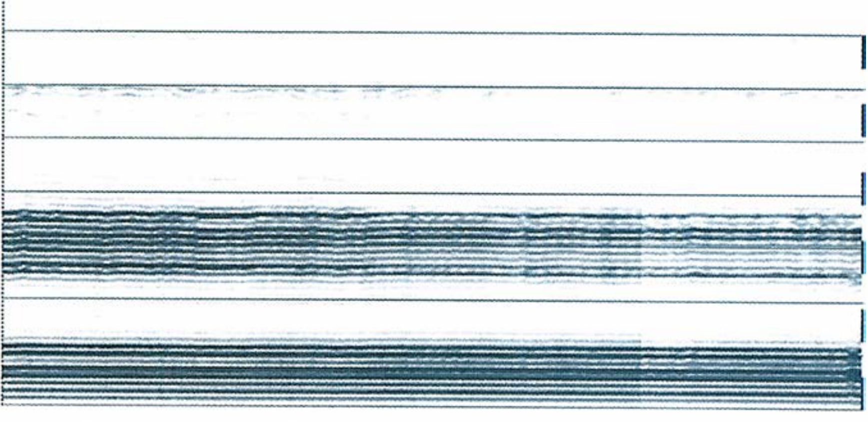
Sin negarle su indudable valor, la técnica ofrece, empero, muchos inconvenientes. No son fáciles ni la ampliación de las cuerdas vocales ni la documentación fotográfica sobre su estado. La iluminación normal tampoco permite distinguir las vibraciones, complejas y rápidas, de las cuerdas vocales.

La principal técnica de que disponemos para estudiar la vibración de las cuerdas vocales es la video-laringo-estroboscopia, que se vale de un micrófono colocado cerca de la laringe para activar el estroboscopio iluminador de las cuerdas vocales. Si la frecuencia de la luz estroboscópica se desfasa en unos dos hertz de la vibración, el médico puede ver en su exploración las cuerdas vocales con un movimiento lento simulado. Esta técnica, que se insinuó ya en el siglo pasado, no alcanzó su esplendor hasta los últimos diez años, cuando, la estroboscopia consiguió el brillo suficiente y las videocámaras una sensibilidad adecuada para su uso rutinario.

El efecto estroboscópico facilita la ponderación minuciosa del estado en que se halla el borde libre de las cuerdas. Podemos ver pequeñas masas, asimetrías vibratorias, úlceras, carcinomas incipientes y otras anomalías laríngeas, muchas de las cuales se hurtan a la luz normal. El análisis digital de las imágenes complementa la observación óptica; si bien la pobre resolución de las imágenes y otras limitaciones han condicionado hasta la fecha las posibilidades de la técnica.

Para seguir el comportamiento de las vibraciones de las cuerdas contamos también con la electroglotografía. Entre dos electrodos instalados en el cuello se produce una corta diferencia de potencial que atraviesa la laringe; los cambios operados por el voltaje medido generan una onda en el electroglotógrafo que ilustra el contacto entre cuerdas vocales. La información acerca de la apertura glótica se infiere de la fotoglotografía, que mide la luz que pasa debajo mismo de las cuerdas vocales, o de la glotografía de flujo.

La medición de la función aerodinámica consta de pruebas funcionales respiratorias y del flujo aéreo de la laringe. Se trata de un parámetro importante, y ambas pruebas revelan en su conjunto el funcionamiento de la fuente de potencia vocal y la eficacia de los repliegues vocales en su control del flujo aéreo. La medición de la capacidad fonatoria —o capacidad para producir sonidos— sirve, en su simplicidad, para cuantificar las disfunciones vocales y evaluar los resultados del tratamiento. Los tests determinan la gama de frecuencia y de intensidad de la voz, cuánto tiempo puede mantenerse un sonido y otros factores.



3. VOCES SANAS Y VOCES ALTERADAS, comparadas en estos sonogramas registrados durante la exposición de sendos conferenciantes y relativos a la pronunciación de la "a" abierta. El tiempo transcurre de izquierda a derecha durante dos segundos aproximadamente. Las líneas horizontales señalan las frecuencias en hertz

La electromiografía laríngea, otra técnica para estudiar la función vocal, consiste en insertar unos finos electrodos en los músculos laríngeos. En determinadas circunstancias es útil para conocer la integridad neuromuscular y su función; a modo de ejemplo, la medición de la actividad eléctrica de los músculos de la laringe podría indicar la recuperación de un paciente con parálisis de cuerda vocal, en cuyo caso el médico, antes de proceder a una intervención quirúrgica, recomendaría esperar por si ocurriera una recuperación espontánea.

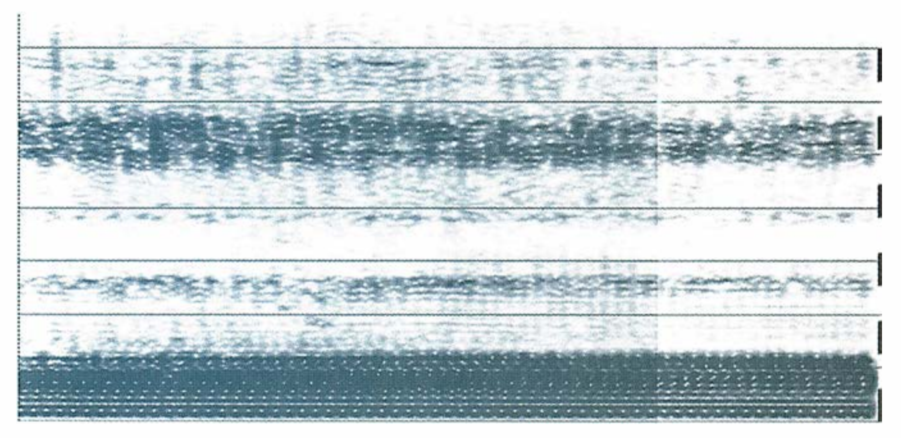
Del propio sonido, el laringólogo experto sacará sus propias conclusiones. Pero está claro que los clínicos e investigadores necesitan equipos capaces de cuantificar las características vocales de interés acústico. Existen equipos, aunque habrán de perfeccionarse.

Pensemos así en la espectrografía acústica, que muestra la frecuencia y el espectro armónico de la voz y registra ópticamente el sonido. El equipo describe la señal acústica e informa sobre la calidad vocal, timbre y volumen. Se puede medir una gama entera de calidades: la estructura del formante y la fuerza de la voz, la frecuencia fundamental, espiración, la razón de armonía a ruido (o claridad de la voz), así como perturbaciones de la amplitud ciclo a ciclo ("brillo") y de la frecuencia ciclo a ciclo ("ritmo"). Otras características más sutiles se escapan a la detección; a modo de muestra: en los estudios de la voz fatigada de profesionales con buena formación, la diferencia entre una voz descansada y otra cansada resulta obvia para el oído, pero ni siquiera los equipos más refinados descubrirán cambios apreciables de manera persistente.

Revisten su interés las influencias psicológicas en la voz; carecemos, sin embargo, de técnicas desarrolladas y normalizadas para mensurarlas. Los cuestionarios bien preparados, las grabaciones en cintas y el reconocimiento de la voz por distintos observadores han disparado la utilidad de tales exámenes. De semejante muestrario de herramientas se sirven los médicos para detectar y registrar, con seguridad y fiabilidad, la información contenida en el sonido de la voz.

En la medida en que la técnica reforzaba los aspectos diagnósticos y terapéuticos de la medicina de la voz, decrecía la necesidad de la intervención quirúrgica. Para ciertas condiciones basta la prescripción medicamentosa, aunque conviene no olvidar que hasta los medicamentos sin receta obligatoria comportan efectos secundarios que afectan al funcionamiento de la voz. Los antihistamínicos, por ejemplo, provocan sequedad en la mucosa vocal, con resultado de ronquera y tos. Las propiedades anticoagulantes de la aspirina pueden contribuir a pequeñas hemorragias en las cuerdas vocales.

Hay técnicas para rehabilitar las voces dañadas por un empleo inadecuado. La terapia facilita la respira-



desde cero hasta un máximo de 7000. El sonograma de la izquierda corresponde a un varón con cuerdas vocales normales; el de la derecha, a un varón con nódulos en las cuerdas vocales. Esta voz tiene ruidos adicionales en el nivel de los 5000 hertz y ha alterado y debilitado sus armónicos entre 2000 y 4000 hertz.

ción y el soporte abdominal, amén de eliminar la tensión muscular innecesaria de laringe y cuello. Puede incluso curar problemas estructurales de las cuerdas vocales, de manera señalada nódulos (formaciones callosas y duras). La terapia enseña a utilizar cada componente del tracto vocal correctamente —para evitar la violencia y el abuso sobre la voz—, a mantener los niveles correctos de humedad y mucosidad en sus tractos vocales y a mitigar los efectos del humo y otros peligros del entorno.

Pero no siempre basta con una buena higiene y una educada técnica vocal. Encontramos problemas estructurales de la laringe que deberán pasar por el quirófano. Me refiero, por ejemplo, a los nódulos que no han respondido a la terapia de la voz, pólipos (neoformaciones de los tejidos blandos), quistes (masas llenas de líquido) y otras alteraciones.

La mayoría de las patologías benignas son superficiales. Los expertos en fonocirugía disponen de un abanico de técnicas microquirúrgicas para extirpar lesiones del epitelio o capa superficial de la "lamina propria" sin rajar las capas intermedia o profunda del tejido, lo que provocaría cicatrices. En buena parte, la cirugía se realiza a través de la boca, mientras el cirujano observa la laringe a través de un tubo de metal llamado laringoscopio rígido. Un microscopio amplía la imagen; entre el utillaje advertiremos tijeras microscópicas, láser y otros.

Los nódulos, pólipos y quistes del margen vibratorio de las cuerdas se extirpan mejor con el armamentario tradicional. Las operaciones pueden alcanzar un nivel de precisión alto. En algunos casos podemos incluso levantar la mucosa de la cuerda, extraer un quiste u otra masa y volver a colocar la mucosa; sin apenas infligir daño alguno, esta operación ni siquiera requiere postoperatorio (descanso de la voz), y suele recuperarse en seguida la buena calidad de la voz.

Los láseres llevan la fama de instrumentos revolucionarios de alta tecnología. Pero no son siempre la mejor elección para la cirugía de la laringe. Con la densidad de potencia requerida para la ablación, el haz de un láser de dióxido de carbono estaría rodeado de un halo de calor de una anchura de 0,5 mm. Si el rayo se dirigiera contra una lesión del borde de una cuerda, el calor podría rasgar las capas intermedias o profundas de la "lamina propria", señales que crearían un segmento rígido de la cuerda vocal, acompañado de ronquera.

Pero el láser de dióxido de carbono es ideal para determinadas lesiones. Esclerosa vasos sanguíneos varicosos de las cuerdas vocales que podrían provocar hemorragias. Vaporiza los vasos sanguíneos que nutren a los pólipos, papilomas y cánceres laríngeos. Es éste un dominio, el de la técnica láser, de esperanza para la microcirugía del futuro.

Las nuevas técnicas quirúrgicas para modificar el esqueleto de la laringe deben mucho al japonés Nabuhiko Issiki. Se aplican al tratamiento de la parálisis de las cuerdas vocales, que es una consecuencia normal de infecciones víricas, cirugía o cáncer. Para abordar la parálisis de las cuerdas, el cirujano solía inyectar pequeñas dosis de teflón en la zona afectada de la cuerda. El teflón empuja la cuerda paralizada hacia adelante hasta la línea media de la glotis y permite que la cuerda normal se junte. La glotis se cierra entonces y mejora la voz del paciente.

Aunque el teflón es bastante inerte, no constituyen ninguna rareza las reacciones de los tejidos. La rigidez que produce el teflón en el borde de la cuerda vocal mina la calidad de la voz. Y si no satisface el resultado de la inyección de teflón, se hace muy difícil extraer el material de los tejidos. Lo que explica, por otro lado, que se haya sustituido esa inyección por la tiroplastia, en virtud de la cual el cirujano abre una pequeña ventana en el esqueleto de la laringe y empuja hacia atrás al cartílago tiroides y los tejidos de la laringe. El cartílago deprimido se mantiene en su sitio con un trozo de silastic. Con esta operación, la cuerda vocal se empuja hacia la línea media, sin necesidad de inyectar ningún cuerpo extraño en los tejidos; parece ser más reversible que el teflón. Nosotros hemos presentado una técnica de inyección que usa, en vez de teflón, una pequeña cantidad de grasa extraída del abdomen o brazo del paciente; el método posee la sencillez del teflón y carece de sus inconvenientes, pero habrá que seguir investigando.

La cirugía del esqueleto de la laringe modifica, si se quiere, el timbre del paciente. El cirujano lo elevará moviendo los cartílagos tiroides y cricoides y cerrando el intervalo espacial que los separa; con esos cambios, las cuerdas se alargan y tensan. O puede también el médico cortar secciones verticales del cartílago tiroides para estrechar los pliegues vocales, rebajar su tensión y, por tanto, bajar el timbre. No se conoce bien el pronóstico de tales intervenciones cuando se buscan por razones puramente estéticas. Sí se ha comprobado su eficacia en ciertas anomalías y en ajustes del timbre de quienes se han sometido a cambio de sexo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CLINICAL MEASUREMENT OF SPEECH AND VOICE. R. J. Baken. College Hill Press, 1987.

THE SCIENCE OF THE SINGING VOICE. J. Sundberg. Northern Illinois University Press, 1987.

PROFESSIONAL VOICE: THE SCIENCE AND ART OF CLINICAL CARE. R. T. Sataloff. Raven Press, 1991.

THE SCIENCE OF MUSICAL SOUNDS. J. Sundberg. Academic Press, 1991.

THE PRINCIPLES OF VOICE PRODUCTION. I. R. Titze. Prentice-Hall (en prensa).

VOICE SURGERY. W. J. Gould, R. T. Sataloff y J. R. Spiegel. C. V. Mosby Company (en prensa).

Puentes prefabricados

La construcción de puentes se agiliza con la prefabricación de sus elementos. Los mayores, doblemente atirantados, podrían salvar vanos de 3000 metros

Jean Muller

La solución tradicional para la construcción de puentes, tanto de los clásicos que salvan grandes distancias, como de los de pequeña luz —por ejemplo, los pasos sobre autopistas— consiste en la colada de hormigón en obra, bien sobre encofrados móviles que descansan en pilares o bien sobre andamiajes. Se trata de métodos lentos: se necesita una semana para colar un par de dovelas (elementos de la tabla del puente) por cada lado de los pilares, lo que supone una velocidad de construcción de unos 750 metros al año. La ejecución de las obras de un viaducto de 18,5 kilómetros de largo como el recién terminado en Monterrey, en México, hubiera requerido unos veinticinco años. Con los métodos modernos de prefabricación, la obra se terminó en menos de dos años.

¿En qué consisten estos nuevos métodos? ¿De qué tipos son los puentes que cabe construir con ellos? ¿Qué modificaciones y adaptaciones reclaman para que cumplan los pliegos de condiciones específicas de los puentes de autovías, de los ferroviarios, de los construidos en zonas sísmicas, etc.? ¿Por qué y en qué difiere la construcción de viaductos de carretera, que deben salvar gran distancia sobre vaguadas, de los pasos sobre vías rápidas? ¿Cuál es la luz máxima alcanzable en la actualidad? Abordaremos estas cuestiones examinando la construcción de obras de diversas características; desde puentes de vigas de mediana luz, como los de Monterrey, Bangkok o del río Roize (cerca de Grenoble); puentes de gran alcance, como los de Hawai o Wando (Carolina del Sur), o los puentes atirantados para luces muy grandes, todavía en proyecto.

JEAN MULLER es director del departamento de obra artística de la Sociedad *Scétauroute* y director técnico de la Sociedad *Jean Muller International*. Posee, entre los galardones recibidos, la Eiffel de Oro del año 1988.

Si bien cada obra tiene sus peculiaridades, determinadas por las condiciones generales de construcción, el uso al que será destinada y la climatología local, la construcción de puentes se vale de un fondo de conocimiento común, enmarcado por los códigos de cálculo definidos por los servicios técnicos nacionales, que estipulan las cargas máximas autorizadas, las normas de construcción, los materiales utilizables, etc. Sean viaductos de carretera o puentes ferroviarios, rectos o curvos, de grande o pequeña luz, todos los puentes se construyen de acero o de hormigón, cuyas características de resistencia y de fatiga han sido estudiadas minuciosamente y cuya aplicación en obra es mucho menos costosa que la piedra.

Al departamento de estudios cumple asegurar que los puentes permitan el tráfico (que sean, pues, capaces de soportar los ciclos de cargas que genera la circulación por ellos) y resistan los azares de la naturaleza: los efectos del viento y los ciclos de hielo y deshielo, mucho más insidiosos.

Los usos a que estén destinados y las regiones donde hayan de ser ubicados plantean problemas más específicos. En las regiones sísmicas, el conjunto de la obra tiene que deformarse sin llegar a la rotura; en las construcciones ferroviarias, que soportan pesos mucho mayores que los viaductos de carretera, la deformación y el perfil longitudinal del raíl han de mantenerse dentro de los límites definidos por las condiciones de explotación de las redes de ferrocarriles. En determinados medios, caso de las ciudades o de entornos naturales protegidos, el proyecto ha de considerar métodos de construcción que minimicen el impacto ambiental del tajo y de la obra ejecutada.

La prefabricación de puentes cuenta 25 años. Tras el premoldeado de las dovelas, ideado por el ingeniero francés Eugène Freyssinet para la construcción de puentes en arco sobre el río Marne, que fueron realizados por Campenon Bernard entre 1946 y 1950, nosotros hemos construido el primer puente de dovelas prefabricadas y juntas conjugadas en 1952, en las cercanías de Buffalo, en el estado de Nueva York; el puente de Choisy-le-Roi, sobre el Sena, constituyó acto seguido la primera aplicación del relleno de juntas con resina epoxídica. Tal aplicación señaló el comienzo de la era industrial de la construcción de puentes de dovelas prefabricadas.

La prefabricación

La prefabricación no presenta como única ventaja la rapidez de ejecución; garantiza también una regularidad en las calidades (es más fácil producir hormigón en fábrica que a pie de obra), de suerte que la resistencia y la regularidad geométrica resultan superiores; además, la normalización de formas y métodos permite una reducción considerable de los costos y los tiempos de construcción. Examinemos, tomando como ejemplo el proyecto de San Antonio, en Texas, de qué forma han sido puestas en práctica las ideas anteriores.

Corresponde dicha obra a un gran viaducto compuesto por dovelas prefabricadas, que ha de efectuarse en un medio urbano difícil. Para asegurar el enlace de dos autopistas mediante un paso elevado en pleno centro urbano, resultaba imperativo minimizar el impacto de la obra a nivel del suelo. Propusimos una estructura de pilares en *T*, muy fina en la base, con una barra (el tablero) que alcanzaba una anchura de 13 metros. Cuando el puente pasaba sobre estructuras amovibles, como las carreteras preexistentes, los pilares sim-

ples se reemplazaban por pórticos a caballo sobre la calzada.

Para la realización de tal obra hemos propuesto el montaje de las dovelas prefabricadas sobre cintras o bóvedas móviles (las dovelas son los elementos que, por yuxtaposición, forman los tramos que salvan el vano entre dos pilares sucesivos) sometidas a compresión por medio de cables exteriores a la estructura. Las diversas operaciones, que se desarrollan en paralelo, son las siguientes: para empezar, las dovelas de hormigón se cuelan en factoría o en instalaciones fijas establecidas en las cercanías de la obra y son almacenadas en espera de ubicarlas en posición (las dovelas, cuya masa está comprendida entre 30 y 200 toneladas, se manejan después mediante grúas de pluma o de pórtico). Simultáneamente, los pilares y los pórticos son colados en su lugar mediante encofrados, o bien, se colocan si han sido prefabricados. Cintras de montaje, es decir, armazones de acero colocados entre dos pilares, reciben acto seguido las dovelas que constituirán los tramos de la tabla; una vez concluido un tramo, las dovelas que la componen son sometidas a compresión y hechas solidarias mediante cables tendidos; por fin, las cintras, cuya parte trasera está provista de ruedas que descansan sobre la tabla realizada, se halan hacia delante hasta el pilar siguiente y se repite la operación de colocación de las dovelas.

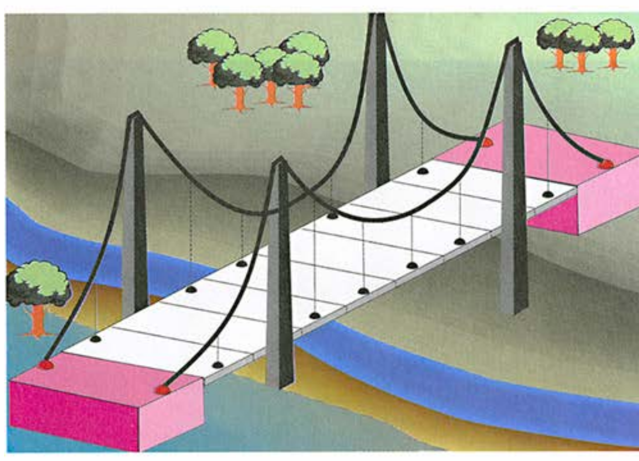


1. LA PREFABRICACION permite la ejecución pronta de grandes obras públicas. El puente sobre la bahía de Tampa (*arriba*) mide 6700 metros; el tramo central, que sobrevuela el canal navegable, tiene una luz de 370 metros. Está compuesto por 830 dovelas prefabricadas de hormigón, con un peso de 200 toneladas cada una (*abajo*). La construcción duró solamente tres años.

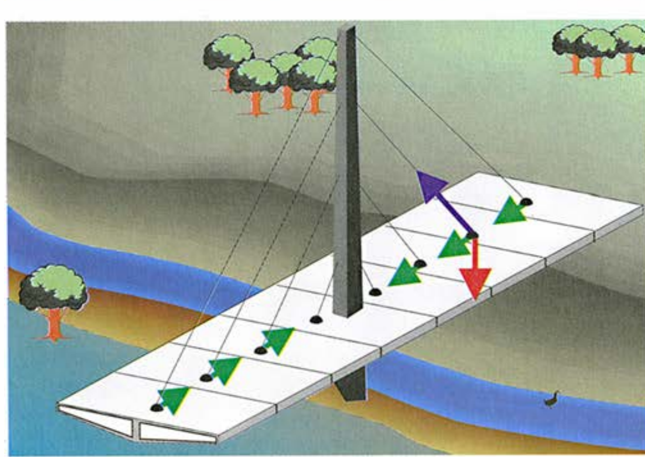
Ensamblado y cables

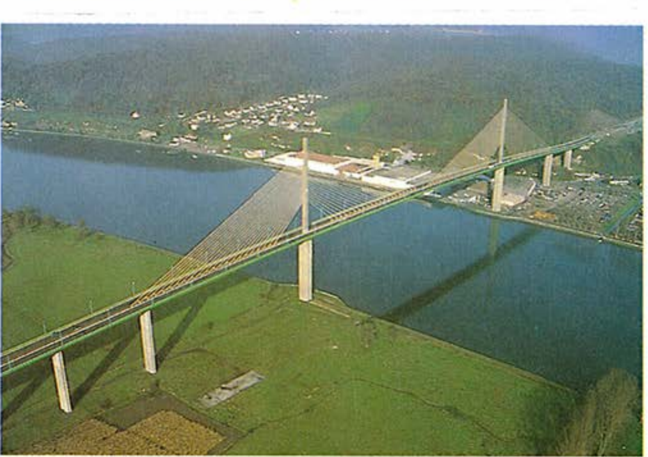
Este sistema se funda en varios inventos patentados hace ya más de veinte años: la colocación por viga de tendido o por cintra de ensamblado y la prefabricación de dovelas. Se efectúa esta última en bancada larga o corta, según las circunstancias. El método de prefabricación en bancada larga es el más antiguo. Sobre un molde de fondo continuo (cuya longitud es un tramo) se cuela una primera dovela con ayuda de un encofrado móvil exterior y de un núcleo interior. Al día siguiente, cuando el hormigón ya posee suficiente resistencia, se desencofra esta dovela y se desplaza el encofrado sobre el fondo del molde una distancia igual a la longitud de la dovela; se cuela entonces la segunda dovela utilizando la primera de contramolde para una de las caras. La operación se repite día tras día, para todas las dovelas del tramo.

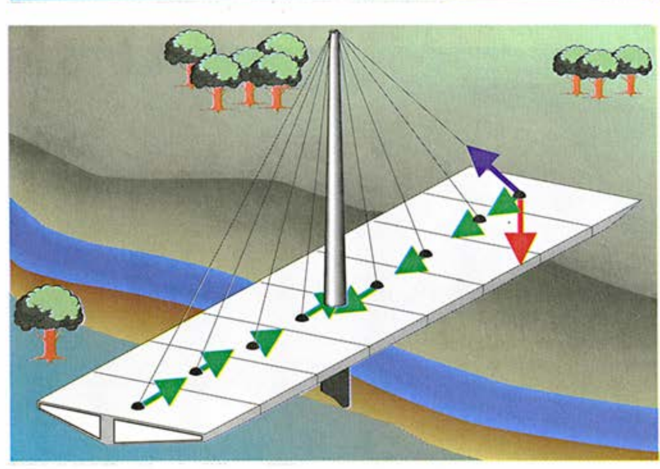
Con este método, los relieves que figuraban en la cara de contacto de la primera dovela aparecen en negativo en la segunda. Es frecuente que estos relieves, determinados por la forma del contramolde, constituyan encajes de cinco centímetros de espesor, pero hasta las irregularidades de colado tienen su contrapartida de una dovela a la siguiente. Después,

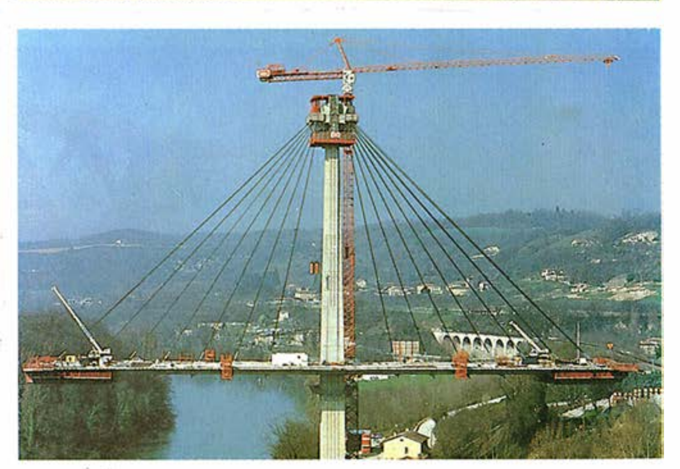












2. METODOS DE SUSPENSION. En las obras colgantes, como el puente de Aquitania, en Burdeos (*arriba*), un cable largo corre de extremo a extremo del puente. Los extremos del cable se fijan a macizos de anclaje ubicados en las riberas; el tablero del puente está sostenido por péndolas. En los puentes atirantados clásicos, las dovelas del tablero penden del pilón de sostén mediante cables. Es frecuente que los cables sean paralelos; tal configuración en arpa ha sido la utilizada en el puente de Brotonne, sobre el río Sena (*centro*). Es posible aumentar la luz de tales puentes disponiendo los tirantes en abanico, caso del puente del Isère, entre Grenoble y Valence (*abajo*). Los esfuerzos de compresión sobre el tablero son menores.

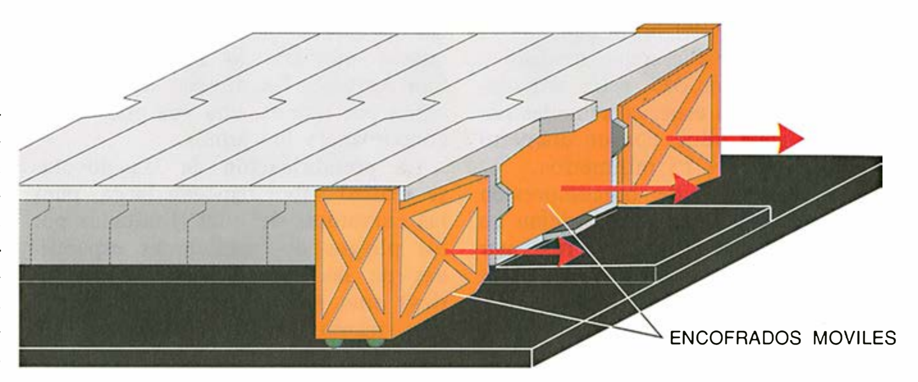
en el ensamblado, la precisión del ajuste es del orden del milímetro.

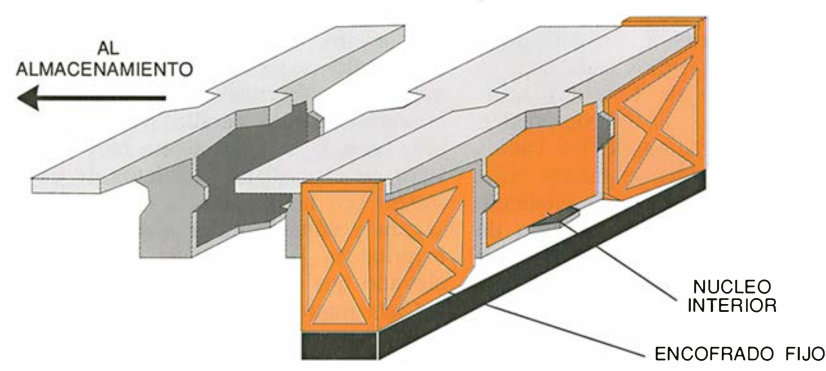
En las regiones frías y húmedas, donde los ciclos de hielo hacen reventar las fisuras y debilitan el hormigón (el agua que se infiltra se dilata cuando la temperatura desciende por debajo de 4 ºC), las juntas se sellan por relleno con resina epoxídica, que las torna estancas y las protege. La complementariedad de los relieves evita que el hormigón se aplaste o se resquebraje al comprimir las dovelas en el proceso de colocación.

Este método impone, sin embargo, un fuerte gasto en un fondo de moldeo de gran longitud y no se adapta fácilmente a la realización de puentes curvos. Lo hemos modificado proponiendo el método de bancadas cortas, cuyo fondo de moldeo equivale a la longitud de una dovela. Se cuela una dovela; después, al día siguiente, se la deposita mediante una grúa al costado del fondo de moldeo y se la utiliza de contramolde para uno de los costados, lo mismo que en el método de bancadas largas. La operación se repite una y otra vez; las dovelas se almacenan o se transportan directamente al tajo.

En ocasiones, las circunstancias tornan impracticable el ensamblado de las dovelas mediante la viga de tendido. En Linn Cove, en los Apalaches, hemos construido un puente de autopista en un parque natural. Era imperativo minimizar el impacto de las obras sobre el medio natural. En consecuencia, resultaba imposible el desplazamiento de una cintra apoyada en el suelo y el transporte de las dovelas por carretera; por ello, en el proyecto se preveía una construcción "sobre la marcha". Las dovelas se iban trayendo en camión sobre la porción de tabla ya realizada y depositadas sobre la cabecera de la tabla con ayuda de una cabria móvil, siendo inmediatamente solidarizadas a la tabla mediante cables. Los pilares, prefabricados también, no eran colocados hasta que la obra llegaba a su correspondiente emplazamiento.

En todas las construcciones de hormigón pretensado, los cables de pretensado desempeñan un papel esencial. Dado que los tramos no son estables por el mero peso de las dovelas (contrariamente a las bóvedas de las catedrales, que se sostienen por su forma en arco, que equilibra los empujes) se recurre, para hacer solidarias las dovelas, a cables tendidos de un tramo a otro en la dirección de la tabla. Estos cables pueden estar o no inmersos en el hormigón de las dovelas; cuando son exteriores, esto es, no incrustados en





3. LAS DOVELAS prefabricadas de hormigón se realizaban al principio por el método de bancada larga, sobre fondos de moldeo de longitud igual al de un tramo (intervalo entre dos pilares). En este método (*arriba*) cada dovela se cuela apoyándose en la dovela precedente, de modo que las caras en contacto sean complementarias; ello permite crear tableros continuos y regulares. De todas formas, este método no permite realizar de forma sencilla construcciones curvas. Hoy también se utiliza bastante el método de bancadas cortas (*abajo*), en el que el fondo de moldeo tiene tan sólo la dimensión de una dovela. La dovela realizada la víspera es desplazada para servir de contramolde de la dovela siguiente.

ellas, se anclan a macizos situados a la derecha de los pilares ligados a las diversas dovelas mediante "sillas de desviación". Una vez ensambladas las dovelas, se tensan todos los cables de un tramo mediante gatos hidráulicos, que aplican fuerzas de 300 o 400 toneladas a cada cable.

En el proyecto de San Antonio se utilizó este tipo de precompresión exterior juntamente con una cintra móvil de ensamblado autotransportada.

Puentes ferroviarios

La comparación del puente de San Antonio, un puente de carretera, con el viaducto ferroviario de Monterrey nos muestra la adaptación de las técnicas de prefabricación de las dovelas de hormigón para puentes de ferrocarril. El viaducto de Monterrey tiene una longitud de 18,5 kilómetros, divididos en 619 tramos de unos 27 metros cada uno; soporta dos vías paralelas de ferrocarril y, según estipula su pliego de condiciones, no ofrece en ningún punto curvaturas de radio inferior a 250 metros ni pendientes superiores al 2 por ciento.

En un puente de estas características, las variaciones de flecha han de ser mínimas, a pesar de las considerables cargas que suponen los trenes, sobre todo cuando se cruzan. En Monterrey fueron prefabricadas un total de 6500 dovelas de sección constante sobre 20 bancadas largas equipadas con un total de 26 encofrados para dovelas corrientes y de 14 encofrados para las dovelas de los pilares. La tabla superior del tablero, que soporta los raíles, está precomprimida en el sentido transversal del puente por una pretensión aplicada sobre los bancos de prefabricación.

Todos los sistemas de precompresión tienen el propósito de hacer que el hormigón trabaje en compresión, de suerte que las tensiones que ulteriormente puedan crear las cargas no lleguen jamás a someter al material a esfuerzos de tracción. El hormigón puede soportar esfuerzos de compresión considerables (hasta varios centenares de atmósferas) pero resiste mal los esfuerzos de tracción (su tensión de rotura es de 10 a 15 veces menor que la compresión de rotura).

En el sistema de precompresión en pretensión se efectúa, por una parte, la colada de las piezas en torno a alambres o cables previamente sometidos a tensión, tensión que es relajada

tras el fraguado del hormigón con el fin de que el esfuerzo se traslade a éste. En la actualidad, estas armaduras de pretensión están constituidas por cabos de siete hilos, con un diámetro exterior de 10 a 15 milímetros.

En el sistema de precompresión por postensión se prevén y dejan en las dovelas conductos abiertos por cuyo interior se tienden los cables de precompresión, bien tras el fraguado, bien tras la colocación en su lugar; se inyecta después en los conductos mortero de cemento para proteger de la oxidación el acero. Los cables de postensión, constituidos por cabos de siete hilos cada uno, se agrupan en haces de 12 a 110 milímetros. En el caso de precompresión exterior, la protección de los cables puede hacerse mediante fundas individuales de polietileno o mediante una sola funda para el conjunto de todos los cabos. La técnica de pretensión es, en principio, menos onerosa que la postensión, pero sufre ciertas limitaciones; la más notable, que no permite ejercer compresiones más que según un eje rectilíneo.

En Monterrey, el ensamblado de las dovelas se efectuó mediante ocho cintras móviles; lo mismo que en San Antonio, las dovelas se solidarizaron por tramos, una vez puestas en concordancia las juntas.

La prefabricación de las dovelas se realizó sobre bancada larga, pues las curvaturas del vial (limitadas por los pliegos de condiciones específicas de las construcciones ferroviarias) eran muy suaves. Ensamblábamos tramos rectos; obtuvimos las curvaturas de la vía desviando levemente los tramos sucesivos. Tal ensamblado poligonal no es posible cuando los radios de curvatura son demasiado pequeños, porque el método de prefabricación no consiente la variación del peralte (la inclinación lateral), lo que resulta muy molesto en el caso de viaductos de carretera (en las curvas, la conducción segura y cómoda exige que el borde exterior de la calzada se halle más elevado que el borde interior).

Cada tramo fue ensamblado en dos días, por término medio. Los 18 apeaderos distan entre sí unos 1100 metros; los andenes están soportados por elementos prefabricados de hormigón, solidarizados a la caja del tablero.

Construcción sobre arena

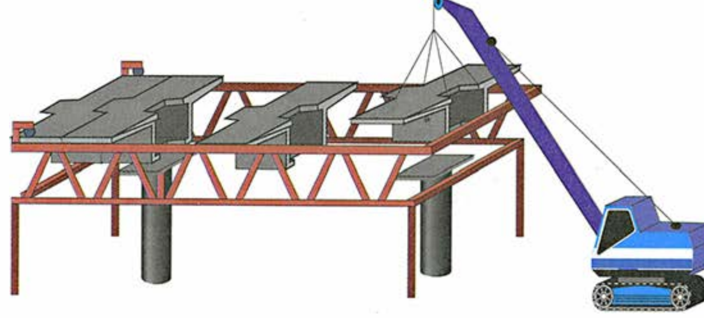
Todavía resaltan más las ventajas de la prefabricación en el proyecto de vías rápidas de Bangkok. La ciudad, saturada por la circulación rodada, ha emprendido el tendido de una red viaria elevada, cuya segunda mitad se encuentra en construcción. Esta red comprende un total de 1575 tramos de 42 metros de longitud media, con una longitud total de 66 kilómetros de puente y una superficie de tablero de 770.000 metros cuadrados.

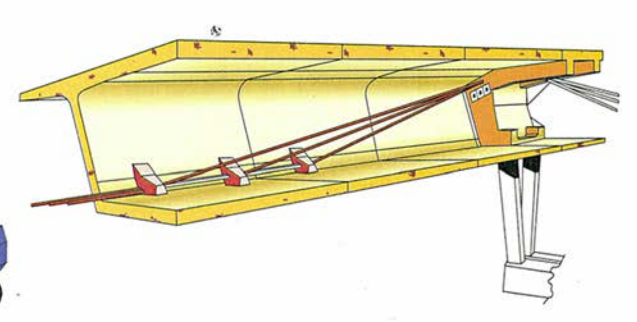
En este proyecto, las dovelas tienen 15 metros de anchura y 2,4 metros de altura. En un circuito así, de muchos kilómetros de longitud, resulta necesario efectuar ajustes de trazado a intervalos regulares. A tal fin, colocamos al recto de cada pila una junta no conjugada, que permite las rectificaciones.

La red de Bangkok es igualmente ejemplar por las especiales cimentaciones que se han requerido ante la





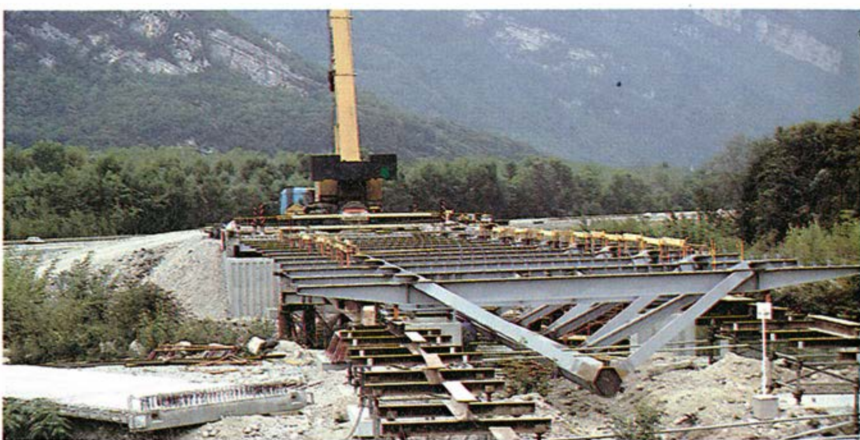


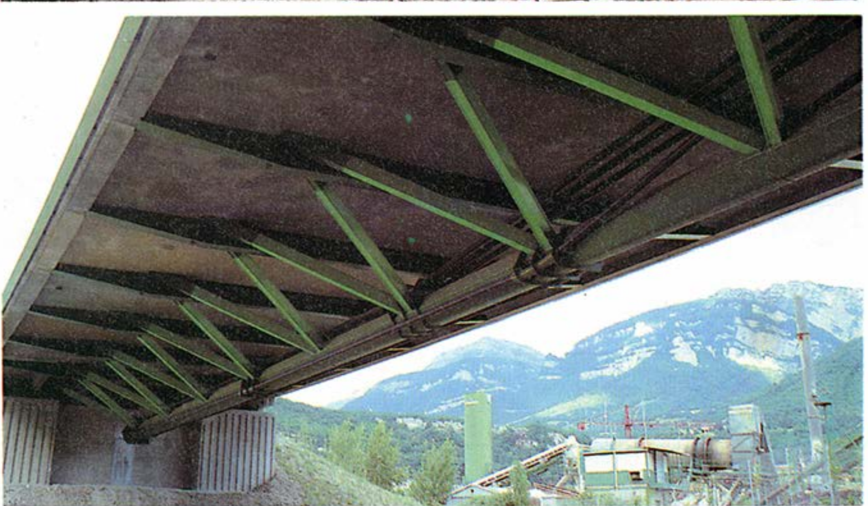


4. EL ENSAMBLADO de las dovelas prefabricadas se efectúa por sucesivo encaje en salidizos, partiendo desde los pilares, con auxilio de una viga de tendido (*arriba, a la izquierda*). En tiempos más recientes se viene utilizando una cintra móvil que descansa sobre los pilares y que es desplazada mediante una enorme grúa de un tramo al siguiente (*abajo, a la izquierda*). Esta estructura metálica ligera va recibiendo las dovelas prefabricadas; una vez completo el tramo, se solidarizan sus dovelas mediante cables de postensión, que pueden ser interiores (alojados en conductos creados ya en la prefabricación) o exteriores (*abajo, a la derecha*). Cuando el relieve del terreno impide utilizar cintras, las dovelas son colocadas por avance,"sobre la marcha", mediante grúas móviles que las depositan; las dovelas se van solidarizando al tramo una por una. La fotografía superior derecha muestra la realización del viaducto de Linn Cove, en los Apalaches.

escasa consistencia del terreno aluvial en que descansa. Como el asentamiento del suelo no podía ser considerado constante para todas las pilas, evitamos la deformación del tablero realizando tramos isostáticos, vale decir, independientes. De ordinario, la técnica de tramos isostáticos hace incómoda la conducción de vehículos a causa de la multiplicidad de juntas de la calzada, pero en Bangok los tramos han sido reunidos de cuatro en cuatro, con una junta de hormigón y barras postensadas entre dos tramos sucesivos de un grupo; los automovilistas no percibirán el paso de las juntas más que en uno de cada cuatro tramos. En cada tramo, las juntas entre dovelas son secas (sin sellado con resina) y la resistencia está asegurada por cables exteriores.

En esta realización, las 20.500 dovelas han sido prefabricadas en bancadas cortas, a razón de 750 al mes. Tal solución venía impuesta por las curvaturas de la red y del reducido espacio disponible para la prefabricación. El ensamblado del tablero exigió la utilización de los dos grandes métodos de construcción por dovelas prefabricadas, esto es, cintras que trabajan o por debajo o por encima del tramo en construcción, juntamente con manipulación de las dovelas por el nivel superior.





5. ESTE PROTOTIPO de puente de muy gran alcance ha sido construido sobre el Roize. Las dovelas se reducen a un placa de hormigón que sirve de tablero; para la armadura se recurre al acero. El puente, de 112 metros, reposa sobre dos estribos en las laderas del valle y sobre dos pilares. La estructura es compuesta: grandes placas prefabricadas de hormigón que descansan sobre vigas de acero transversales (las "piezas de puente"); estructuras tetraédricas en metal que soportan dichas vigas y soldadas a ellas mediante viguetas de acero; un larguero inferior constituido por un tubo de metal; cables de postensión exteriores, orientados, como en los puentes de hormigón prefabricado, mediante sillas de desviación.

Estructuras compuestas

La última realización de puentes de vigas que vamos a considerar es representativa de soluciones de nuevo tipo, obtenidas por aplicación de acero y hormigón a las dovelas prefabricadas. En el puente sobre el río Roize, en la autopista gala A49, las dovelas se reducen a una placa, que hace de tablero; el acero se utiliza para armazones y armaduras. En el sistema propuesto, prototipo de un proyecto más audaz de puente de gran luz, se emplean acero y hormigón de gran resistencia para aligerar el puente, al tiempo que se consigue una gran rigidez a costo mínimo.

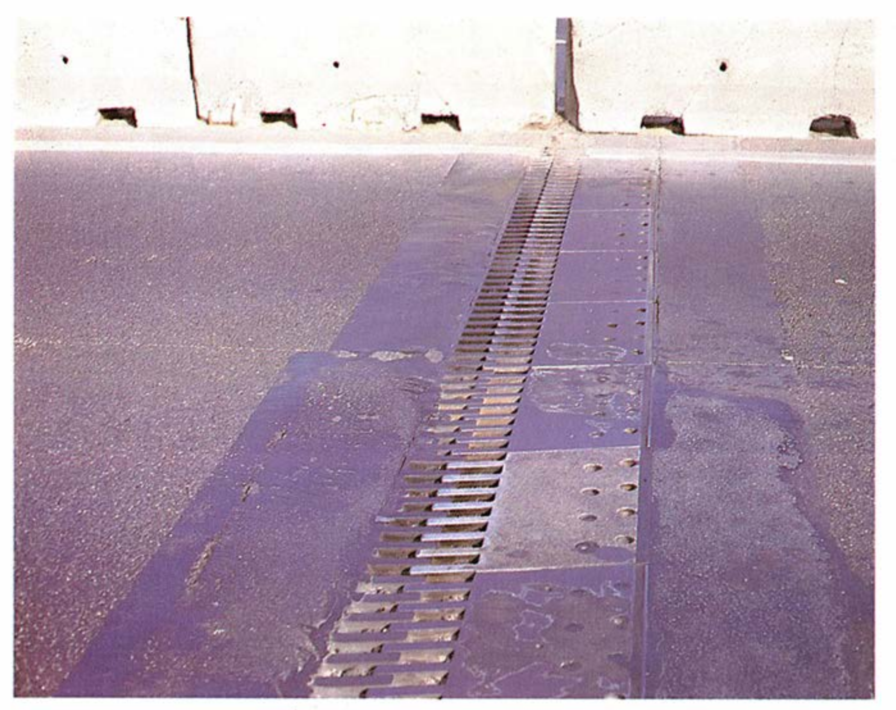
El puente del Roize no es muy grande, pues se extiende sólo 112 metros, y reposa sobre dos pilas y dos estribos en las riberas del valle. La estructura está compuesta por los elementos siguientes: para la calzada, grandes placas prefabricadas de hormigón, de cuatro metros de longitud y 14 centímetros de grosor, provistas de armaduras pretensadas; estructuras tetraédricas metálicas que soportan las vigas transversales (las "piezas de puente"), que van soldadas a ellas; un larguero inferior constituido por un tubo de acero; cables exteriores de postensión, orientados, lo mismo que en un puente de hormigón prefabricado, mediante sillas de desviación.

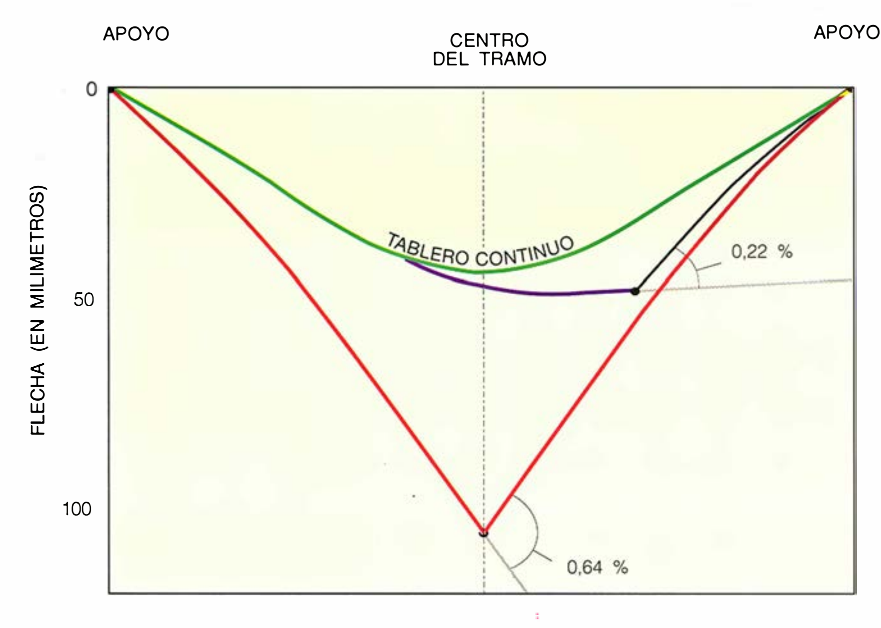
La ejecución de la superestructura saca partido de los progresos de la industria cementera; merced a las mejoras en su composición (y de forma muy señalada, gracias a sílice de muy reducida granulometría) el material seleccionado resiste 80, cuando no 100 megapascales (de 800 a 1000 atmósferas); además, la losa superior está sometida a postensión transversal.

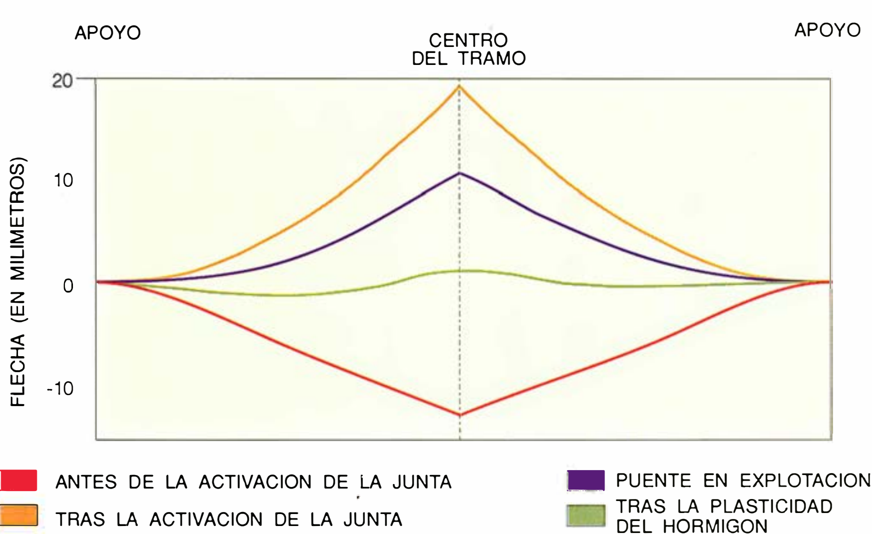
Por otra parte, el sistema de unión entre las dos armaduras se funda en la más sencilla de las figuras geométricas indeformables: el triángulo. (Un cuadrado articulado en sus vértices se deformaría a efectos de las cargas laterales.) La estructura metálica está compuesta por tetraedros cuya arista inferior forma parte del tubo inferior, de suerte que las aristas superiores, transversales, sostienen el tablero; con esta configuración, la estructura presenta triángulos tanto en vista lateral como en planta, que permiten al puente trabajar en compresión axial en las diversas diagonales. Por último, la armazón inferior es reforzada por cables exteriores de postensión, dispuestos como en los puentes de dovelas prefabricadas de hormigón.

Se ha previsto que la construcción se efectúe por transporte de conjuntos prefabricados compuestos por un tetraedro de armazón, de un segmento de tubo inferior y de una pieza de puente superior; el montaje, efectuado con ayuda de una cintra móvil, será análogo al de las dovelas en hormigón prefabricado, siendo soldados los elementos del larguero inferior y taponándose las juntas de acoplamiento por colado de hormigón.

En todos los ejemplos vistos hasta ahora, la luz, esto es, la distancia







entre pilares, era bastante reducida. Cuando hay que salvar ríos anchos o valles profundos se recurre a puentes de luz muy grande con el fin de limitar el número de apoyos. Tales puentes suelen presentar el problema añadido de su cimentación.

Existen múltiples técnicas para la construcción de apoyos sumergidos, que son adaptados según las circunstancias y obras. Una de ellas consiste en preparar un dique o barrera provisional de acero, que delimita un espacio donde son excavados los cimientos para luego colar allí el hormigón de las fundaciones.

La realización del viaducto Windward en la isla de Honolulú (Hawai) ha obligado a utilizar otra técnica, pues aunque los tramos de este viaducto no son largos, los pilares habían de descansar en zona montañosa y además sísmicamente activa. La obra consiste en un viaducto de dos calzadas paralelas. En la solución clásica, cuando el emplazamiento lo permite, los pilares descansan sobre zapatas de hormigón de cinco a diez metros de lado, ancladas al suelo

6. LAS JUNTAS DE EXPANSION (*fotografía superior*) aseguran la continuidad de la calzada a pesar de las dilataciones y contracciones del tablero por las variaciones de temperatura. La solución clásica consistía en situarlas en el centro de cada tramo (*gráfico central, en rojo*), pero tales juntas son muy sensibles a las variaciones a largo plazo de los materiales (relajación del acero, plasticidad del hormigón), con lo que el centro de los tramos se deprime permanentemente y el perfil de la vía acaba por formar un ángulo molesto. Una primera tentativa consistió en reemplazarlos por tableros continuos, en los cuales los tramos, construidos simétricamente a partir de los pilares, eran unidos por cables que conferían a las estructuras un comportamiento monolítico (*en verde*). Se eliminó así el problema de las roturas de pendiente; en cambio, aparecieron esfuerzos de tensión en los miembros inferiores, en el centro de los tramos. Una segunda solución consiste en situar la junta de expansión en el punto de equilibrio de los momentos de cargas estáticas, hacia un cuarto de los tramos, que se comportan como tramos continuos, con tablero sin punto singular y flecha reducida (*en azul*). Puesto que este método complica la construcción, se ha pensado en devolver las juntas de expansión al centro de los tramos y neutralizar los esfuerzos que sufre el tablero mediante vigas de unión provistas de cilindros hidráulicos gobernados en tiempo real. Así se podrían mantener, además, las características de las obras a pesar del envejecimiento de los materiales y controlar las reacciones de los puentes ante los terremotos o el tráfico (*abajo*).

mediante machones o pilotes. Se prefabrican columnas de hormigón de 40 a 60 centímetros de diámetro y de longitud adaptada a la calidad del terreno (de 10 a 30 metros) en moldes tendidos sobre el suelo. Los pilotes se ponen en pie mediante una grúa y se clavan en el suelo; se instala en su extremo superior un martillo que golpea la cabeza del pilote y va hincándolo en el terreno. Se procede, por último, al colado de las zapatas sobre estos pilotes.

En Hawai, tanto la fabricación de los pilotes como su enclavamiento resultaban difíciles; optamos, pues, por la perforación de pozos de gran diámetro limitados por camisas metálicas, que una vez vacíos de tierra rellenamos de hormigón. No solamente quedaron resueltos los problemas de sustentación que el suelo planteaba, sino que evitamos, además, la remoción de los importantes volúmenes de tierra que hubiera supuesto la explanación de las grandes plataformas horizontales necesarias para la preparación de las zapatas.

El ensamblado de las dovelas se efectuó por la técnica de salidizo, aunque optimizado por la utilización de una sola viga de tendido para los dos tableros. El dispositivo consistía en dos armazones gemelos que se desplazaban sobre ruedas por los tableros ya construidos, dotados de un pórtico móvil para la manipulación de dovelas. Esta máquina, patentada en 1990, dispone de sistemas de nivelación que garantizan precisiones del orden de un milímetro en la colocación.

Puentes inteligentes

La resistencia de los puentes de gran alcance constituye casi siempre un difícil problema de mecánica, al que es preciso buscar una solución ingeniosa. Una vía para conseguirla podría consistir en la realización de obras dinámicas e "inteligentes".

Históricamente, los primeros puentes de hormigón pretensado estaban dotados de juntas de expansión en el centro de cada tramo; en la losa de la calzada del tablero se incrustan peines de dientes metálicos complementarios que reposan sobre un colchón de neopreno, con el fin de permitir las dilataciones y retracciones longitudinales, coordinando al propio tiempo los desplazamientos verticales. La experiencia ha demostrado que estas juntas son muy sensibles a las variaciones a largo plazo del acero y del hormigón. El centro de los tramos descendía de forma permanente y el perfil de la vía presentaba una discontinuidad enojosa.

Intentamos paliar este defecto en el puente de Choisy-le-Roi ensayando un primer método, a saber, el puente de dovelas prefabricadas con tablero continuo. Los tramos, simétricamente construidos a partir de los pilares, estaban unidos mediante cables que dotaban a la estructura de un comportamiento monolítico. Si bien de esta forma se eliminaban los problemas de discontinuidad de la pendiente, más tarde aparecieron anomalías en otros puentes de tramo continuo, debidas a la evolución del comportamiento del hormigón y a los gradientes térmicos. Son de señalar, sobre todo, esfuerzos de tensión en los miembros inferiores del tablero, en el centro de los tramos, por haber sido incorrectamente estimados los efectos de plasticidad en el hormigón.

No obstante, en los puentes de gran longitud (superior a 300 metros) sigue planteado el problema de la ubicación de la junta de expansión. El gráfico central de la figura 6 indica una solución. Se ha calculado la deformación causada por la circulación rodada en el tablero de un puente de gran alcance para dos posiciones de la junta de uno de los tramos del puente de Oléron (compuesto por 40 tramos continuos de 80 metros). Cuando esta junta se halla en el punto de equilibrio de los momentos de las cargas estáticas, cerca del cuarto de tramo, éste se comporta como un tramo continuo, con tablero sin punto singular y flecha reducida a la mitad. Por ello, se adoptó la norma de ubicar la junta de expansión en este lugar, cual atestiguan obras como el puente de Saint-Cloud, el de Sallingsund (Dinamarca), los puentes de Columbia o de Zilwaukee (Estados Unidos) y, más recientemente, el viaducto de Hawai descrito.

Sin embargo, el precio a pagar por la mejora de prestaciones ha sido la complejidad de concepción. La nueva ubicación de la junta de expansión hace más lenta la construcción por avance (en el caso de puentes de muy gran alcance, las dovelas se van colocando simétricamente a uno y otro lado de los pilares) y la correcta colocación de los cables de precontracción longitudinal no es sencilla.

Para eliminar estas dificultades hemos propuesto el retorno de la junta de expansión a la antigua posición en el centro de los tramos; ahora bien, en vez de permitir que los dos semiastiles se desplacen libremente, se ejercen empujes variables mediante gatos hidráulicos controlados en tiempo real en función de las cargas aplicadas y de las deformaciones progresivas de la obra provocadas por las variaciones de temperatura y por el envejecimiento de los materiales del puente. Los sistemas hidráulicos convertirían al puente en un sistema servocontrolado, capaz de encajar las modificaciones de carga debidas, por ejemplo, al frenado de un tren o a un seísmo.

Puentes muy grandes

¿Cuál es la luz máxima que puede alcanzar un puente? ¿Qué material y qué concepción permiten conseguir tal luz máxima? Señalemos, para empezar, que los puentes de grandes luces han de ser livianos; el acero habrá de ser el constituyente fundamental de la estructura y los elementos de hormigón habrán de ser aligerados y adelgazados recurriendo a hormigones de elevadas prestaciones.

Las estructuras de vigas de celosía han demostrado su utilidad, pero los mayores puentes construidos estos últimos años han sido sobre todo puentes de tirantes y puentes colgantes. Las diferencias entre uno y otro tipos atañen a la forma en que se emplean los cables de sostén del tablero.

En un puente colgante, un cable continuo, anclado por ambos extremos, se extiende sobre toda la longitud del puente, pasando sobre el dintel de los pórticos o el ápice de los pilones; cables menores de suspensión, las péndolas, ligadas al cable principal, sostienen al tablero a intervalos regulares. La forma del cable (la curva geométrica denominada catenaria) cambia dinámicamente para equilibrar la carga. Por ejemplo, la circulación de trenes por el puente modifica notablemente la catenaria, y el tablero, que es rígido, reparte los esfuerzos "leyendo", por así decirlo, las deformaciones. Sin embargo, la flecha de uno de estos puentes, con una luz de 1200 metros, es de diez metros, frente a los dos necesarios para un puente de tirantes, en el cual las figuras formadas por el tablero, los tirantes y los pilones son triángulos, esto es, figuras indeformables.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LE CONCEPT DES PONTS BIHAUBANES. J. Muller y J. Lockwood, AIPC/ABSE Leningrado, octubre de 1991.

LE PONT BI-HAUBANE ET LES PROBLEMES AEROELASTIQUES. Jean Muller, ISALB *International Symposium on Aerodynamics of Large Bridges*, febrero de 1992.

PRECAST SEGMENTAL CONSTRUCTION. Jean Muller, FIP, Congreso de Budapest, mayo de 1992.

Mente y significado en los monos

Los monos verdes de Africa oriental, aunque se comunican según pautas que recuerdan aspectos del habla humana, no parecen reconocer estados mentales en sus compañeros

Robert M. Seyfarth y Dorothy L. Cheney

Durante los campeonatos de tenis de Wimbledon de 1981, los jueces hubieron de resolver un problema insólito. Algunos jugadores, en especial Jimmy Connors, emitían broncos gruñidos al golpear la pelota. Sus contrincantes protestaban y pedían que cesaran esos ruidos voluntarios que les distraían hasta destrozar su ritmo.

Cuando los jueces hablaron con Connors y demás jugadores sonoros, recibieron una explicación distinta. Según aquél, había quienes rugían adrede. El no, pues carecía de control sobre sus gruñidos, que sólo sobrevenían en los raquetazos violentos. Idéntica explicación ofreció el resto: estaban convencidos de que algunos jugadores sí emitían ruidos voluntarios con el fin de distraer al contrario, pero uno por uno negaban poseer control consciente sobre tales expresiones guturales.

Así las cosas, los jueces afinaron su observación, durante el desarrollo de los partidos, para poder establecer qué gruñidos eran intencionados y cuáles no. Les resultó prácticamente imposible. Lo único evidente para todos era que los sonidos, fueran voluntarios o espontáneos en los raquetazos, acababan con la concentración del antagonista.

En el dilema de los jueces aparecen problemas que se les plantean a cuantos se disponen a estudiar las emisiones de voz, o vocalizaciones, de monos y primates. Los totas o monos verdes de Africa oriental, por ejemplo, se avisan unos a otros ante situaciones muy dispares. Así, emiten fuertes gritos de alarma si avistan a un depredador, chillan sonidos que semejan las palabras *urr* y *cháter* si salen al encuentro de otros grupos, lanzan gruñidos de amenaza y un tipo de *cháter* distinto cuando se pelean con individuos de su propio grupo, y gruñen sin estruendo durante las interacciones sociales relajadas. En ninguna de esas situaciones podemos afirmar que el mono intenta comunicarse deliberadamente con otro; pero tampoco sabemos si el animal carece de control sobre su vocalización y si sus gritos forman parte del comportamiento en curso.

Nos hemos propuesto determinar si los monos poseen palabras para designar objetos ("depredador", por ejemplo) y si comprenden que determinados sonidos representan fenómenos de su entorno. En otras palabras, ¿piensan los monos? Nos hemos esforzado también por averiguar si alcanzan estados mentales (conocimiento, creencia o deseo) y, lo que quizá sea más importante, concedido que los tengan, si acaso reconocen que los demás también los poseen.

Los pioneros en los trabajos de campo con monos y primates daban por supuesto que eran escasas, si las había, las semejanzas entre la comunicación gutural animal y el lenguaje humano. Partíase de que el habla humana quedaba bajo control voluntario, podía desligarse de la emoción (podemos hablar de miedo sin estar asustados) e intervenían áreas corticales superiores del cerebro; las vocalizaciones de monos y primates, por contra, eran en buena medida involuntarias, producíanse sólo en circunstancias muy emocionales y se encontraban bajo un control cortical limitado. Las palabras humanas representaban objetos y acontecimientos del mundo exterior; los gritos de monos y primates indicaban exclusivamente el estado emocional o el comportamiento inminente de un individuo.

La primera señal de que tal planteamiento podría ser falso se manifestó, a través de dos fuentes distintas, en las postrimerías de los años sesenta. Allen y Beatrix Gardiner, de la Universidad de Nevada en Reno, anunciaron en 1969 que Washoe, un chimpancé, había aprendido más de treinta signos realizados con las manos; el primate recurría a tales signos para referirse a determinados objetos, pedir algo o "simplemente hablar". (Más tarde se demostraría que el número de signos que un primate puede aprender es mucho mayor.) Para unos, Washoe no se distinguía del oso de circo que se sube a una bicicleta: el entrenamiento le había permitido adquirir una habilidad que cae fuera del alcance del comportamiento ordinario de un chimpancé. Otros se sorprendieron por la cuantía de signos del repertorio y se preguntaban si una tal comunicación era completamente extraña entre chimpancés u otros primates no humanos.

Dos años antes, Thomas Struhsaker, entonces en la Universidad de California en Berkeley, había publicado que los monos verdes de Africa oriental emitían llamadas sonoras distintas según los depredadores amenazantes; tres en particular: leopardos, águilas y serpientes. Cada llamada desencadenaba su peculiar respuesta de huida, adaptativa según parecía, de los totas de las inmediaciones. Los gritos de alarma que denunciaban la presencia de un leopardo provocaban que los monos verdes treparan a los árboles, donde quedaban a salvo del ataque de los felinos. Las alarmas que avisaban del

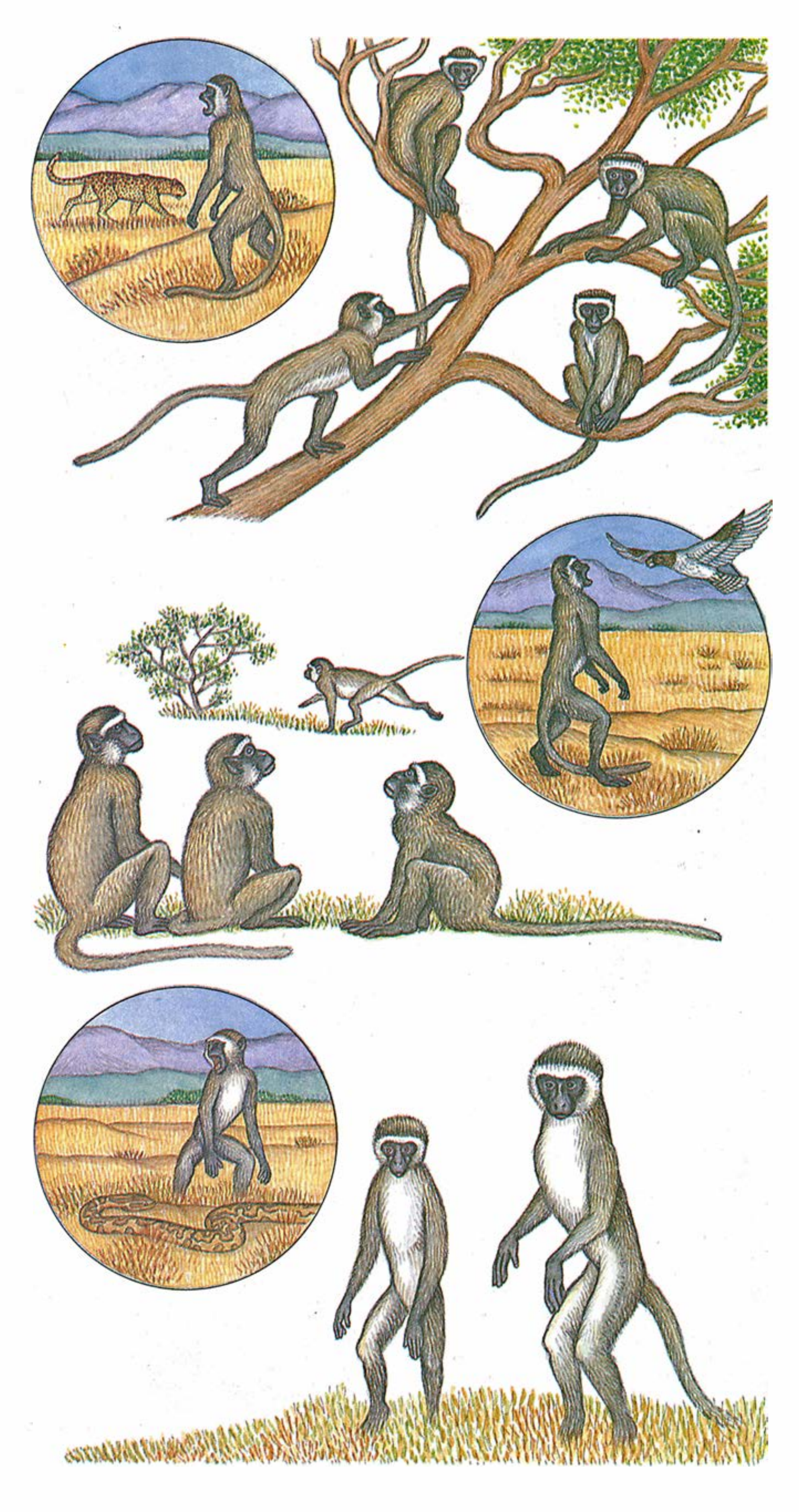
ROBERT M. SEYFARTH y DOROTHY L. CHENEY estudian el comportamiento social, la comunicación y la cognición en los monos. Seyfarth se licenció por la Universidad de Harvard en 1970 y se doctoró por la de Cambridge en 1977. Tras dar clases en la Universidad de California en Los Angeles (UCLA), lo contrató la de Pennsylvania para enseñar psicología. Cheney se doctoró también en Cambridge el mismo año que Seyfarth. Es profesora de biología en la Universidad de Pennsylvania.

vuelo próximo del águila les inducía a mirar hacia arriba o correr hacia los matorrales; al oído de las alarmas de serpientes, se erguían sobre las patas traseras y observaban el herbaje. Lo mismo que Washoe, los totas parecían emplear signos distintos para indicar objetos diferentes o diversas formas de peligro.

Hubo, sin embargo, interpretaciones más escépticas. En vez de aludir a clases de depredadores, esas alarmas podían constituir meras señales generales de alerta que hacían que los animales miraran a su alrededor. Localizado el depredador, la respuesta consiguiente obedecía a lo visto, no a lo oído. De acuerdo con otra explicación, las expresiones de aviso no denotarían tanto diferencia de depredadores cuanto intensidad relativa del miedo que despertaban los leopardos, las águilas y las serpientes; si esta interpretación fuera la correcta, se debilitaría bastante la analogía entre las llamadas de alarma de los totas y las palabras humanas.



1. MONOS VERDES atentos a las vocalizaciones de otros miembros de su banda. Los sonidos pueden indicar encuentros con otro grupo de monos verdes, interacciones con miembros de su propia banda o el avistamiento de un depredador.



2. DIFERENTES AVISOS DE ALARMA emitidos por los monos verdes en respuesta al avistamiento de al menos tres depredadores principales: leopardos (*arriba*), águilas marciales (*centro*) y serpientes, como la pitón africana de las rocas (*abajo*). Los monos varían su ruta de huida de acuerdo con la llamada específica. Los experimentos realizados con avisos de alarma registrados muestran que los gritos sirven de señales representativas, o semánticas, para los monos.

En 1977, éramos entonces becarios posdoctorales en el laboratorio de Peter Marler en la Universidad Rockefeller, diseñamos experimentos para comprobar tales hipótesis. Realizamos nuestra investigación en la misma zona donde Struhsaker había llevado a cabo su estudio original: el Parque Nacional de Amboseli, en Kenia meridional, al pie del monte Kilimanjaro. Allí, los monos verdes viven en grupos de 10 a 30 individuos; cada grupo comprende de uno a ocho machos adultos, de dos a ocho hembras adultas y su descendencia. El grupo se reserva un área aproximada de 4 hectáreas, defendida con agresividad ante la incursión de otros.

A semejanza de lo que ocurre en muchas otras especies de monos del Viejo Mundo (papiones, macacos bunder o macacos japoneses), las hembras de totas permanecen a lo largo de su vida en el grupo en el que nacieron y mantienen lazos sociales estrechos con sus parientes matrilineales. Los miembros de cada línea materna suelen acicalarse y dormir juntos, amén de ayudarse entre sí en las alianzas agresivas. Los machos, en cambio, se trasladan a grupos vecinos cuando alcanzan la madurez sexual, que se produce en torno a los cuatro años de edad.

Las hembras adultas se distribuyen jerárquicamente en orden de dominancia; los hijos ocupan el rango inferior inmediato de la madre. De ello nace una estructura grupal que consiste en una jerarquía de familias, en las que todos los miembros de la familia A poseen rango superior a todos los de la familia B, y así sucesivamente. Un macho puede asumir el escalón jerárquico de su madre hasta que se traslada a otro grupo. En el grupo de adopción, el nivel social de un macho depende de factores diversos: capacidad de lucha, edad y aceptación por las hembras adultas.

En los primeros meses de nuestro trabajo de campo acumulábamos registros de llamadas, emitidas por cualquier tota en sus encuentros con leopardos, águilas marciales (el principal depredador aviar de los monos) y pitones. Después, reprodujimos las grabaciones de los avisos ante los monos, a través de un altavoz escondido. Filmamos, por último, las respuestas de los animales.

Examinamos toda esa documentación. Y descubrimos que los experimentos con grabaciones duplicaban exactamente las respuestas a los gritos de alarma que Struhsaker y nosotros ya habíamos observado en

condiciones naturales. Al oír las grabaciones de alarmas relativas a leopardos, los monos se encaramaban a los árboles; las alarmas grabadas correspondientes a la presencia del águila les levantaba la mirada hacia arriba o se escondían entre los matorrales; por fin, ante la alarma registrada de serpiente se ponían de pie y escudriñaban la hierba circundante.

Las respuestas que desencadenaban las grabaciones de los distintos tipos de alarma contradecían la hipótesis según la cual las vocalizaciones serían señales de alerta generales. Los sonidos transmitían, diríase, información sobre la presencia de tipos específicos de peligro.

Teníamos pruebas también que desmentían la segunda posibilidad, la de que las llamadas de alarma se limitaran a reflejar el grado de miedo o de excitación del animal que las emitía. Cuando alteramos nuestras cintas para hacer variar el nivel de excitación del emisor, haciendo que las llamadas fueran más largas o cortas, más fuertes o suaves, el cambio no se notó en las respuestas cualitativamente distintas de cada llamada de alarma.

Por último, al haber disparado las alarmas cuando no había depredadores reales en los alrededores, quitábamos todo fundamento a la hipótesis según la cual las respuestas de los monos dependían de lo que habían visto y no de lo que habían oído. En resumen, cada tipo de aviso de alarma, presentado por separado, desencadenaba la misma respuesta que se tendría ante un depredador natural determinado. Por lo que llegamos a la conclusión de que las llamadas de alarma operaban a modo de señales representacionales, o semánticas.

Pero hay razones sólidas para andar con cautela a la hora de trazar paralelismos entre las vocalizaciones de los monos y las palabras humanas. Decimos que las alarmas de los monos verdes son señales semánticas apoyándonos en la manera en que dichos signos funcionan en su vida cotidiana. Cuando un tota oye el aviso de alarma de águila, se comporta como si él mismo hubiera visto el ave amenazadora; conducta que nos sugiere que, en la mente del mono, la llamada "representa a", o "evoca imágenes de" tal depredador, pese a que el mono no haya visto al águila.

Se trata, no obstante, de una inferencia precipitada. Para los perros de Pavlov, el sonido de una campanilla podía haber evocado imágenes de comida; ahora bien, ese hecho no demuestra que los perros entendieran la relación referencial entre campanillas y comida de la misma manera que nosotros entendemos la relación entre la palabra "silla" y un determinado tipo de mueble, por ejemplo.

La llamada del mono dejaría de ser mero sonido para convertirse en palabra, si se produjera cierta transformación. Tal como sugiere el psicólogo David Premack, este cambio se daría en el caso exclusivo de que las propiedades adscritas a la llamada no fueran las de un sonido sino las del objeto que denota.

El lenguaje humano ofrece algunos ejemplos excelentes: si comparamos el sentido de las palabras "felonía" y "traición", dejamos de lado sus diferencias acústicas; las suponemos similares porque tienen afinidad de significado. Decimos, por contra, que "traición" y "tracción" son palabras muy distintas, a pesar de su sonido compartido; la razón yace en que poseen un significado diferente.

En la enunciación de tales juicios, reconocemos la relación referencial entre las palabras y los objetos que denotan. Al comparar palabras, las consideramos similares o diferentes en razón de su significado, no de sus propiedades acústicas. Por tanto, precisábamos determinar si las llamadas de los monos verdes merecían la calificación estricta de palabras para poder afirmar que los monos comprenden el significado de sus vocalizaciones.

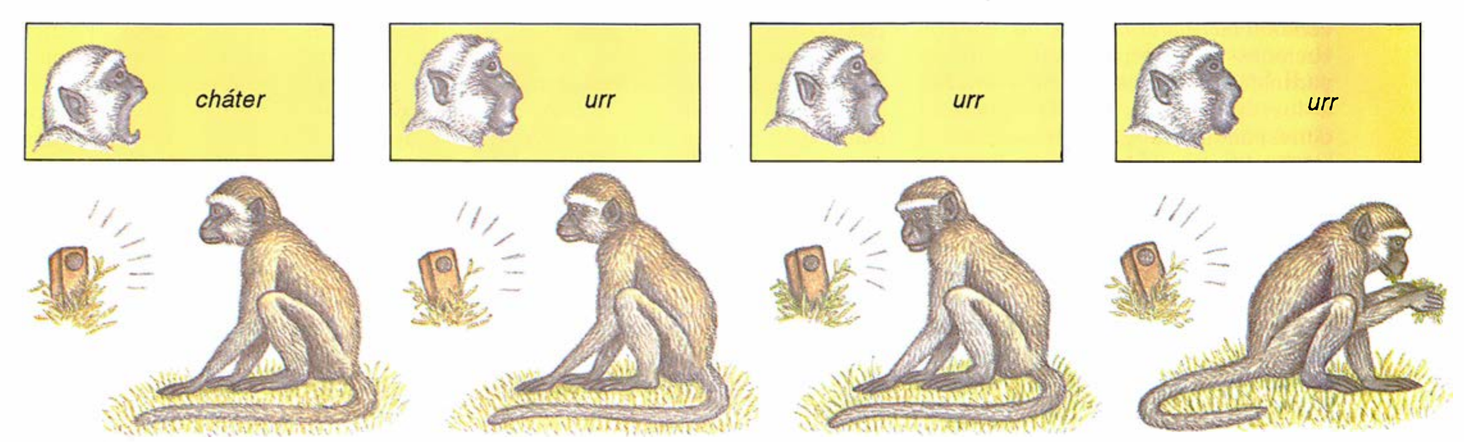
Para investigar de qué modo los monos verdes comparan las vocalizaciones, nos servimos de la técnica de habituación–deshabituación, un método empleado en el estudio de la percepción del habla en los niños. Se basa en la observación de que los sujetos expuestos al mismo estímulo una y otra vez se desentienden gradualmente del mismo hasta dejar de responder: se habitúan. Pero si los individuos que se han habituado a un estímulo perciben otro que juzgan diferente, la intensidad de su respuesta aumenta de forma notable. Así, la técnica de habituación-deshabituación revela si, para el sujeto en cuestión, dos estímulos son similares o distintos.

Nos importaba comprobar si los monos verdes comparan vocalizaciones en razón de sus propiedades acústicas o en virtud del significado que parecía. Para ello, tomamos por estímulos dos llamadas que los monos emiten durante encuentros territoriales con grupos vecinos. Profieren la primera vocalización (un sonido largo y estentóreo, onomatopéyicamente *urr*) en cuanto avistan otro grupo; parece alertar a los miembros de ambos grupos de que se ha visto un tercero por las inmediaciones. La segunda vocalización, un sonido áspero y chillón, que llamamos *cháter*, se emite cuando el encuentro entre grupos alcanza su punto máximo de violencia, persecución o lucha. *Urrs* y *chaters* tienen referentes que se superponen en buena parte (ambos proporcionan información sobre otro grupo), pero son muy distintos desde el punto de vista acústico. Presentados, para su comparación en un experimento de habituación–deshabituación, los sonidos *urrs* y *chaters* se reputarán distintos si los monos basan el cotejo en las propiedades acústicas, pero similares si lo fundan en el significado.

Empezamos por seleccionar un sujeto. El primer día del ensayo, lo expusimos ante la grabación del *cháter* de cierta hembra adulta, con el fin de establecer la intensidad umbral de la respuesta de dicho individuo. El resultado se convirtió en condición de control. El segundo día, el sujeto oyó el *urr* de la misma hembra, repetido hasta ocho veces a intervalos de unos 20 minutos. Puesto que no había otro grupo presente, pensamos que el individuo se habituaría pronto a esa emisión. Por último, transcurridos unos 20 minutos desde el postrer *urr*, oyó de nuevo el *cháter* de la hembra.

La idea de nuestro experimento era que el sujeto en cuestión percibiera la misma volcalización, un *cháter*, en dos condiciones distintas: una vez en ausencia de cualquier llamada previa (situación de control) y otra tras habituarse al *urr* del mismo emisor (situación de prueba). Si, para nuestro sujeto, los *urrs* eran lo mismo que los *chaters* (es decir, si los monos comparaban las vocalizaciones en razón de su significado), entonces la habituación al *urr* de un individuo produciría la habituación al *cháter* del mismo individuo. Y apenas habría diferencia entre la intensidad de la respuesta en condiciones de control y la desencadenada en condiciones de prueba.

Pero si los sujetos consideraban que los *urrs* y los *chaters* eran distintos (es decir, si los monos comparaban las llamadas sobre la base de sus propiedades acústicas y no de su significado), entonces la habituación al *urr* de un individuo no produciría habituación al *cháter* del



3. ESTUDIOS DE HABITUACION, donde se manifiesta que los monos verdes distinguen entre gritos por razón de su significado, en vez de apoyarse exclusivamente en sus propiedades acústicas. *Chaters* y *urrs* difieren en su naturaleza sonora y tienen significados ligeramente distintos, pero ambos describen el encuentro con otro grupo. Cuando un sujeto oye por primera vez un *cháter* registrado (*izquierda*), mira fijamente al origen del sonido. Si luego oye al mismo individuo (*amarillo*) emitir una serie de *urrs*, de

mismo individuo. En este caso, habría poca diferencia en la intensidad de la respuesta entre las condiciones de control y de prueba.

Nos interesaba comprobar otro factor de la respuesta del mono. Por estudios anteriores, sabíamos que los monos verdes, igual que otros muchos mamíferos y aves, toman nota de la identidad del emisor cuando responden al aviso. ¿Transferirían nuestros sujetos la habituación a un individuo hacia otro?

En una segunda batería de ensayos incluimos una modificación: emitíamos las llamadas de dos miembros del grupo. Comenzamos también por establecer, el primer día, la intensidad umbral de respuesta de un sujeto al *cháter* del individuo A. Al día siguiente le hicimos oír los *urrs* del individuo B ocho veces. Habituado ya el sujeto a los *urrs* de B, comprobamos si se había también habituado al *cháter* de A.

En una tercera prueba examinamos qué efecto producía el cambio de lo que parecía el referente de la llamada, manteniendo la identidad del emisor. Repetimos el procedimiento descrito para nuestros primeros experimentos, si bien las vocalizaciones de alarma eran ahora las correspondientes al leopardo y águila, no los *urrs* y los *chaters*. Por último, y con el fin de averiguar si los sujetos se habituarían a individuos y a tipos de llamadas, comprobamos si la habituación a la llamada de alarma de águila del individuo A haría que los sujetos se habituaran a la alarma de leopardo emitida por B.

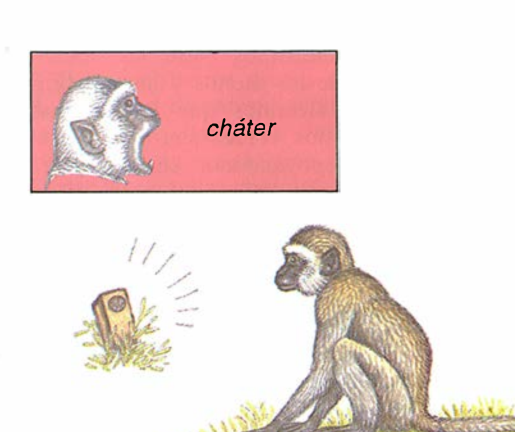
De acuerdo con los resultados obtenidos, nos es lícito afirmar que los monos verdes comparan las vocalizaciones en razón de su significado y no sólo de sus propiedades acústicas. Cuando se les exponía a *urrs* y *chaters* del mismo individuo, se habituaban a los dos tipos de avisos; esto es, el sujeto habituado al *urr* del individuo A dejaba de responder al *cháter* de A. Pero cuando los sujetos oían dos llamadas cuyos referentes eran distintos, no transferían la habituación a las dos clases de avisos: si un sujeto dejaba de responder a la llamada de leopardo del individuo X, respondía con intensidad normal a las alarmas de águila del individuo X.

La identidad del animal emisor influía también en la comparación de las vocalizaciones. Aunque *urrs* y *chaters* tenían referentes similares, la habituación al *urr* del individuo A no provocaba habituación al *cháter* del individuo B. Por último, cuando las llamadas tenían referentes distintos y procedían, además, de emisores distintos, no se transfería o desplazaba la habituación.

Esta serie de experimentos abordaba la cuestión del significado y la referencia de una manera más directa que el método seguido en nuestras investigaciones anteriores sobre las expresiones guturales de alarma en los monos verdes. Se solicitaba ahora que compararan dos vocalizaciones, decidieran si eran similares o diferentes y revelaran los criterios que emplean en su cotejo. De acuerdo con lo observado, cuando un mono verde oye vocalizar a otro, el receptor se forma una representación de lo que significa la llamada. Si el receptor oye una segunda vocalización poco después, compara las dos llamadas, no sólo según sus propiedades acústicas, sino también según sus significados.

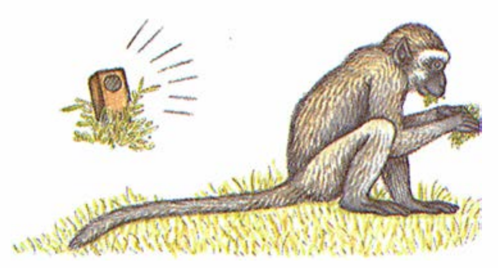
Si aceptamos que la llamada se convierte en palabra cuando las propiedades que se le adscriben no son las de un sonido, sino las que el objeto denota, *urrs* y *chaters* parecen haberse convertido en palabras. Por tanto, los totas parecen poseer un sistema semántico rudimentario en el que algunas llamadas, como las alarmas de leopardo y de serpiente, tienen significado muy distinto; otras llamadas, así *urrs* y *chaters*, remiten a un referente común y representan matices de significado dentro de una clase general.

Por lo que sabemos de la ecología y el comportamiento social de los monos verdes, podemos colegir la razón de que necesiten una tal comunicación y hayan quizá desarrollado las capacidades cognitivas subyacentes. Es evidente que, si la estrategia de huida varía con la clase de depredador amenazante, la distinta sonoridad de la respectiva llamada de alarma constituye un valor adaptativo. Además, suelen recurrir a esas expresiones guturales cuando no se ven entre sí, práctica que favorece la evolución de llamadas cuyo signi-



4. LA IDENTIDAD DEL EMISOR es importante para el que oye. Cuando un in-





los que se muestran algunos (*tres paneles centrales*), se habitúa y deja de responder. Cuando oye de nuevo un *cháter*, no responde: la habituación se ha desplazado.

ficado puede deducirse sólo de peculiaridades acústicas y no dependen de claves contextuales, a diferencia de lo que ocurre con el observador directo.

Más aún: la respuesta apropiada ante una vocalización puede diferir mucho de un individuo a otro. Mientras el emisor de una alarma de águila puede estar en el suelo mirando al cielo, sus compañeros saldrán corriendo hacia los matorrales o bajarán prestos de los árboles. Estas circunstancias favorecen a los emisores que han adquirido capacidad para comunicarse acerca de tales acontecimientos y hacerlo de una manera bastante independiente de su propio comportamiento; y favorecen también a los receptores, preparados para interpretar el significado de una llamada y hacerlo sin tener nada que ver con lo que el emisor dé por hacer después. En resumen, favorecen la comunicación semántica o representacional.

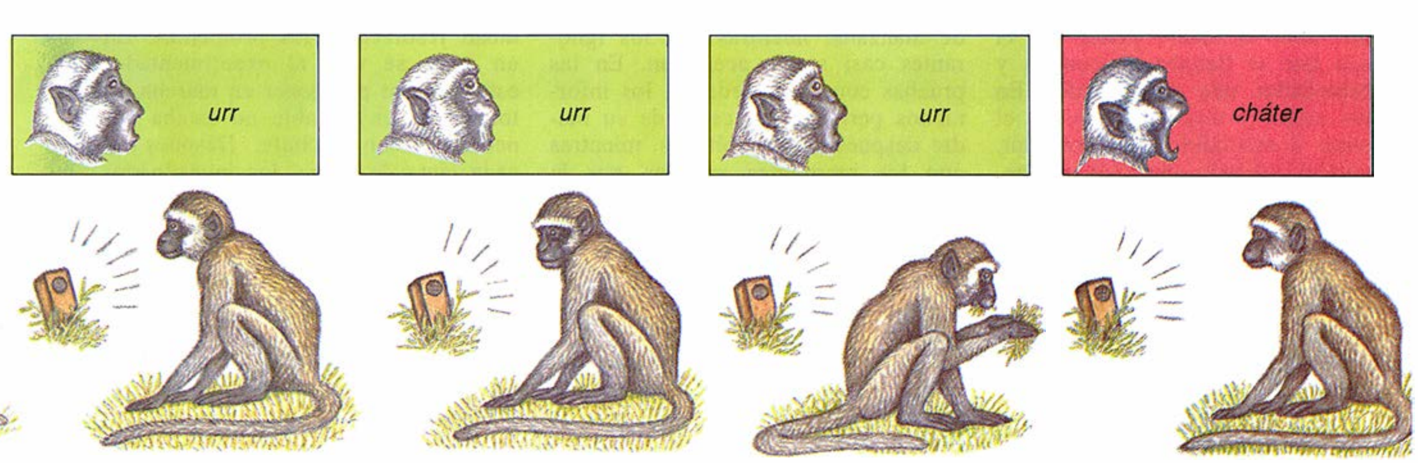
Pero lo que nuestra investigación no decía era si las expresiones guturales de los monos podían elevarse a la categoría de palabras humanas. El lenguaje humano encierra algo más que la mera relación de referencia entre las palabras y los objetos o fenómenos que aquéllas designan. En el proceso de comunicación, atribuimos también estados mentales (verbigracia, conocimiento, creencias y deseos) a los demás. Y reconocemos en los estados mentales un poder causal; por ejemplo, advertimos a los niños que no bajen de la acera mientras esperan que el semáforo para peatones se ponga verde. Nuestra advertencia no viene motivada por su comportamiento (quizás absolutamente correcto), sino por la falta de conocimiento que les atribuimos. En los preadolescentes, esa misma advertencia provoca enfado e indignación; han aprendido a atribuir estados mentales a sus padres. Saben que lo que los padres dicen refleja lo que piensan, y los chicos se sienten rebajados si se les trata con condescendencia.

Atribuir creencias, conocimiento y emociones a los demás es poseer lo que los psicólogos denominan una teoría de la mente. Queríamos saber si los monos distinguen entre sus propias creencias y las creencias y los conocimientos de otros, y si toman medidas especiales para informar a un individuo ignorante o para corregir la creencia falsa de otro.

La idea de que los animales podrían ser sensibles a los estados mentales de otros surgió de investigaciones recientes en torno al efecto de audiencia, observado en aves y mamíferos. Marler y sus colegas repitieron uno de los experimentos clásicos de Nikolaas Tinbergen, en el que se suspende de un alambre la silueta de un halcón y se le hace "volar" sobre un grupo de gallos y gallinas banquiva: los gallos, observó Marler, emitían llamadas de alarma en presencia de una gallina, pero permanecían silenciosos si se encontraban solos con la hembra de otra especie. En la naturaleza, Paul Sherman, de la Universidad de Cornell, encontró que las hembras adultas de ardillas de tierra tenían más probabilidad de enviar señales de alarma si había parientes cercanos presentes que si no los tenían. Nosotros mismos, en experimentos con hembras cautivas de monos verdes, descubrimos que las hembras adultas emitían más llamadas de alarma si estaban con sus propios hijos que cuando se las emparejaba con monos verdes de la misma edad y sexo pero no emparentados.

Aunque es evidente que los animales se muestran sensibles a la presencia o a la falta de una audiencia, este hecho no prueba por sí mismo que se percaten del estado mental de su audiencia. Abundan, además, las pruebas de la incapacidad de los animales de distinguir una audiencia ignorante de otra informada. Los gallos y los monos verdes, por ejemplo, continúan emitiendo llamadas de alarma mucho después de que sus compañeros hayan divisado al depredador y huido.

Para comprobar si existen en los monos las condiciones de una teoría de la mente señaladas, acometimos varios experimentos con dos grupos de macacos bunder y dos grupos de macacos japoneses en el Centro de Investigación Primatológica de California en Davis. En sus hábitats naturales, los macacos bunder y japoneses viven en grupos numéricamente mayores que los de monos verdes, aunque de composición similar. La extensión del parque nos permitía mantener los grupos sociales naturales, al tiempo que ofrecimos



dividuo (*rojo*) emite un *cháter* y un segundo (*verde*) vocaliza una serie de *urrs*, el sujeto deja de responder. Cuando se emite el *cháter* grabado del primero, el sujeto responde de nuevo, la habituación no se extiende a distintos monos emisores.





5. JOVEN MONO VERDE; aprenderá únicamente mediante la observación, sin la tutela de su madre. En el campo y en experimentos, las madres han demostrado su incapacidad en reconocer la ignorancia de sus hijos o en actuar en consecuencia. Estas observaciones sugieren que los totas carecen de una genuina teoría de la mente.

cierta información a algunos que otros no poseían.

Los sujetos de nuestros experimentos eran hembras adultas con sus hijos de dos o tres años. En el caso "informado", madre e hijo se hallaban sentados juntos en un tobogán que conducía a un amplio ruedo circular. Ambos contemplaban, al mismo tiempo, dos situaciones: el cuidador introducía rodajas de manzana en un pozal del suelo, o bien un depredador (en este caso, un técnico que portaba una red de las usadas para capturar monos) hacía gestos amenazadores y después se escondía detrás de una pared del ruedo.

En el caso "ignorante", madre e hijo se sentaban de nuevo juntos, aunque con un divisor de acero por medio. Sólo la madre podía ver el cuenco que se llenaba de comida y al depredador que se escondía. En ambos casos, y una vez colocado el alimento o escondido el depredador, se soltaba, tobogán abajo, al monito.

En la condición ignorante, la madre había observado a su hijo que lo tenía cerca, si bien aislado; podía verosímilmente determinar si éste veía cuanto se desarrollaba en el ruedo. Pretendíamos saber si la madre, igual que los humanos en situaciones similares, llegaría a la conclusión de que, por culpa del aislamiento, su pequeño no habría visto la comida o al depredador.

Si los monos son sensibles a los estados mentales de los demás, las madres debieran haber emitido más llamadas o haber hecho algún ademán inequívoco en el caso de hijo ignorante, de forma mucho más resuelta que en el caso de hijo informado. Ahora bien, si los monos no se percatan del estado mental de su audiencia, el comportamiento de la madre debería ser siempre el mismo, hubieran visto o no sus hijos la comida y el peligro.

Las madres contaban con medios suficientes para determinar el grado de conocimiento de la realidad que poseía su hijo. El ignorante, además de estar aislado detrás del divisor, se comportaba de manera distinta en cuanto se le soltaba. En las pruebas de comida, los monos informados encontraban rápidamente las tajadas de manzana, mientras que los ignorantes casi nunca acertaban. En las pruebas con el depredador, los informados permanecían cerca de su madre después de ser soltados, mientras que los ignorantes vagaban por la jaula, ajenos a la proximidad del depredador. Sin embargo, pese a tantas señales, no observamos diferencia alguna en el comportamiento de la madre en las dos condiciones: en ningún caso avisó a su cría.

Es obvio que estos resultados negativos no respaldan una distinción entre incapacidad para atribuir un estado mental a los demás y fracaso de la puesta en práctica de tal capacidad. Cabe la posibilidad de que los monos reconozcan la diferencia entre su propio conocimiento y el de los demás, aunque esta información no tenga un correlato en su conducta. Pero si los macacos bunder y japoneses pueden distinguir en los demás ignorancia y creencias falsas, su aparente incapacidad de sacar alguna consecuencia de dicha información no deja de ser sorprendente.

Las investigaciones en chimpancés sugieren que estos primates, a diferencia de los monos, pueden poseer una teoría mental rudimentaria. En 1978, Premack y Guy C. Woodruff, entonces en la Universidad de Pennsylvania, acometieron varios ensayos; en ellos mostraron a "Sarah", una hembra chimpancé, cintas de vídeo de experimentadores que intentaban resolver varios problemas. En un caso, se veía al experimentador esforzándose por poner en marcha un tocadiscos cuyo cable no estaba conectado a un enchufe. Después de cada cinta de vídeo, los investigadores ofrecían a Sarah varias fotografías, en una de las cuales se ilustraba la solución al problema; siempre escogía la fotografía correcta.

Premack y Woodruff vieron en el comportamiento de Sarah la prueba de que ella reconocía que las cintas de vídeo representaban un problema y de ahí infería finalidad en los experimentadores humanos. Hubo más. Cuando se le presentaron las cintas donde intervenía su experimentador

favorito y otras donde participaba un experimentador por el que sentía menos simpatía, Sarah eligió las soluciones correctas para el experimentador favorito y las incorrectas para el otro. Años después, el grupo de Daniel J. Povinelli obtenía resultados equiparables en experimentos que requerían que los chimpancés distinguieran entre una condición humana informada y otra ignorante.

En la Reserva tanzana del Río Gombe, Jane Goodall observó en cierta ocasión que un macho adolescente de chimpancé, Figan, engañaba a otros para así aprovecharse de una provisión escondida de alimento. Mientras el grupo se congregaba en la zona de aprovisionamiento, Figan se irguió de repente y se dirigió rápidamente al bosque de suerte tal que todos los demás le siguieron. Al poco, girando sobre sí mismo, dejó a sus compañeros y volvió para comerse las bananas. Ni que decir tiene que se corre el peligro de sacar de quicio esas anécdotas, pues cabe explicar el comportamiento de Figan sin apelar a ninguna teoría de la mente.

Lo que no empece que la bibliografía especializada almacene un impresionante número de casos en los que se ha observado cómo los chimpancés engañan a sus compañeros en contextos dispares y mediante un amplio repertorio de gestos, posturas y expresiones faciales. Por su número y variedad, tales anécdotas ganan en poder persuasivo y sugieren, al menos, la posibilidad de una teoría de la mente en los primates.

La incapacidad de atribuir conocimiento a los demás limita las acciones de una especie. Fijémenos en algunas iniciativas que los animales no pueden emprender si carecen de una teoría de la mente. Cuando las crías de monos verdes empiezan a emitir llamadas de alarma o a responder a las alarmas de los demás, cometen muchos errores. Algunos, como la alarma de águila que emite un monito en respuesta al vuelo de una paloma, resultan inocuos; otros, así el error del monito que levanta la vista al cielo ante una alarma de serpiente, son más graves y aumentan el riesgo.

En estas condiciones, cabría esperar que los adultos se decidieran a ayudar a sus crías para conocer lo relativo a los depredadores. No lo hacen, por sorprendente que nos parezca. En el gran número de observaciones y experimentos que hemos realizado, nunca vimos que los adultos estimularan de forma selectiva a los pequeños que han proferido los avisos de alarma adecuados, ni que corrigieran a a quienes respondían de forma impropia ante una vocalización de riesgo. Las crías de tota aprenden por mera observación, sin tutela explícita. Esta confianza en el aprendizaje observacional, muy extendida en el reino animal, hunde su origen último en la incapacidad de los adultos en percatarse de que el conocimiento de sus hijos es distinto del suyo propio.

El estudio de la comunicación animal va ligado a la investigación de cómo piensan los animales. Por lo que hemos aprendido con los monos verdes, podemos afirmar que las vocalizaciones de los primates no son meros alaridos involuntarios, sino avisos emitidos selectivamente por individuos que tienen en cuenta a su audiencia y variables a tenor de la situación u objeto cambiante del entorno. Lo mismo que las palabras, las llamadas de los monos denotan objetos o acontecimientos distintos; los propios monos pueden, a buen seguro, reconocer incluso la relación referencial entre una llamada y el objeto o el acontecimiento que ésta designa.

Empezamos a comprender con mayor precisión la diferencia que media entre la comunicación y la cognición de los monos y las peculiares de los seres humanos. Aunque la comunicación humana sirve, en buena medida, para condicionar el conocimiento, las creencias y los motivos que subyacen al comportamiento, carecemos de pruebas de que los monos se comuniquen nunca con la intención de influir sobre el estado mental de otro animal. Los monos, y quizá también los primates, no pueden comunicarse con la intención de modificar los estados mentales de los demás porque, según se aprecia, no reconocen que existan dichos estados mentales.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MACHIAVELLIAN INTELLIGENCE: SOCIAL EXPERTISE AND THE EVOLUTION OF INTELLECT IN MONKEYS, APES AND HUMANS. Dirigido por R. Byrne y A. Whiten. Oxford University Press. 1988

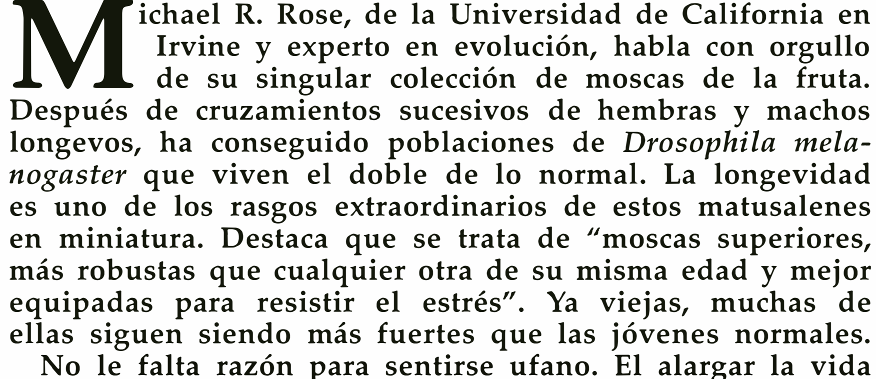
HOW MONKEYS SEE THE WORLD: INSIDE THE MIND OF ANOTHER SPECIES. Dorothy L. Cheney y Robert M. Seyfarth. University of Chicago Press. 1990

TRUTH AND DECEPTION IN ANIMAL COMMUNICATION. D. L. Cheney y R. M. Seyfarth en *Cognitive ethology: The minds of other animals.* C. A. Ristau. Lawrence Erlbaum Associates. 1991

¿POR QUE ENVEJECEMOS?

Ricki L. Rusting




En buena parte, la respuesta está escrita en nuestros genes. Pero, ¿en cuáles? Investigaciones recientes nos ofrecen pistas sugestivas.



Michael R. Rose, de la Universidad de California en Irvine y experto en evolución, habla con orgullo de su singular colección de moscas de la fruta. Después de cruzamientos sucesivos de hembras y machos longevos, ha conseguido poblaciones de *Drosophila melanogaster* que viven el doble de lo normal. La longevidad es uno de los rasgos extraordinarios de estos matusalenes en miniatura. Destaca que se trata de "moscas superiores, más robustas que cualquier otra de su misma edad y mejor equipadas para resistir el estrés". Ya viejas, muchas de ellas siguen siendo más fuertes que las jóvenes normales.

No le falta razón para sentirse ufano. El alargar la vida de una manera notable y mantener la salud, no importa en qué especie, constituye toda una proeza. Pero no termina ahí la tarea del grupo de Rose; ha comenzado a estudiar los alelos, o variantes de genes, que puedan explicar las diferencias existentes entre las supermoscas y sus parientes del montón, y ha identificado ya uno.

El trabajo de Rose sobre la mosca de la fruta forma parte de un proyecto más amplio encaminado a explicar por qué envejece el hombre y, en definitiva, por qué se deteriora nuestro cuerpo y muere de manera inevitable. Algunos mantienen la esperanza de que su empeño investigador abra el camino para frenar el proceso del envejecimiento que conduce a la muerte, un proceso, opinan, sujeto a controles internos. Si lo último es cierto, la detención de dicho proceso ayudaría a retrasar o prevenir buena parte de los tumores y otras enfermedades incapacitantes o letales relacionadas con la edad.

Cualquier tratamiento que retrase el envejecimiento contribuirá, sin duda, a prolongar la vida, aunque pocos estarían dispuestos a admitir que la prolongación de la vida constituya por sí misma un objetivo prioritario. Hace sólo 15 años, los datos aducidos no salían del ámbito de la mera descripción, si excluimos la observación de que la restricción calórica podía prolongar la vida de roedores y otros animales. (La cuestión de cómo actúa la restricción dietética sigue pendiente.) Ahora, las teorías sobre las causas del envejecimiento abundan casi tanto como las mismas moscas: la senescencia seguiríase del estricto cumplimiento de un programa genético que nos conduce a la muerte; deberíase a alteraciones fortuitas del ADN o de algunas enzimas indispensables para el funcionamiento del

1. ESTA MUJER DE EDAD, y como ella muchas otras personas de más de 65 años, viven en asilos de ancianos o en hogares especiales. Comenzamos a entrever las razones de por qué el hombre pierde su vigor y se hace más proclive a una serie de enfermedades a medida que entra en la vejez.

organismo; obedecería a cambios en los niveles hormonales, a un declive del sistema inmunitario o a la actividad inexorable de moléculas extremadamente reactivas y potencialmente destructivas, como son los radicales libres del oxígeno, y así por demás.

Ante gavilla de opiniones tan dispares, escribiría en 1979 Alex Comfort, uno de los pioneros del campo, que "a lo largo de la historia la teoría ha oscurecido de manera ruinosa los estudios sobre el envejecimiento". Lo único que admiten todos es que el envejecimiento lo motiva más de una causa. Van en aumento las pruebas de la intervención de múltiples procesos paralelos, a menudo interactivos, muchos de ellos genéticamente controlados, que se combinan entre sí hasta asegurar la decrepitud definitiva.

La naturaleza pierde interés

Para algunos, Rose entre ellos, no descubriremos las bases fisiológicas de la senescencia, si no conocemos cómo apareció el envejecimiento en la historia de la vida. La teoría evolutiva proporciona una buena parte del entramado necesario para entender el funcionamiento y las disfunciones del organismo —así como para identificar los genes implicados en el control de la duración de la vida.

La teoría evolutiva afirma que los individuos más aptos —aquellos cuyo conjunto particular de alelos les capacita mejor para sobrevivir y reproducirse en su ambiente— son los que dejan su impronta en el acervo hereditario de las generaciones siguientes. Se seleccionarán o se retendrán aquellas modificaciones genéticas que mejoren las aptitudes de los individuos (por ejemplo, capacitándoles para escapar más rápidamente de un peligro); y esas mejoras se habrán generalizado al cabo de algunas generaciones. Determinados rasgos se seleccionan porque es más probable que sus portadores sobrevivan y se reproduzcan con mayor facilidad, aportando una descendencia más numerosa para la próxima generación. Del mismo modo, la selección natural eliminará las mutaciones que sean letales antes de que se alcance la madurez sexual; los individuos afectados no dejarán descendencia, y así acabarán desapareciendo los rasgos letales.

Desde finales del siglo pasado, muchos se han adherido a la idea según la cual la senescencia aumentaría la aptitud de los más jóvenes al fomentar la desaparición de los mayores, evitando el agotamiento de los recursos disponibles; el envejecimiento, sugiere esa opinión, estaría programado en los genes y cuya única finalidad sería la de destruir el organismo. Pero el juicio pierde adeptos, en parte porque la mayoría de los animales no sobreviven en su estado salvaje el tiempo suficiente para entrar en la senescencia. La historia nos muestra que, hasta tiempos no muy lejanos, el hombre moría también muy joven. La esperanza de vida de una persona nacida en un país industrializado se cifra hoy en torno a los 75 años; sin embargo, esa esperanza de vida apenas alcanzó los 30 o 40 años durante el segmento más largo de la historia humana.

Otras hipótesis evolutivas atribuyen a los genes el control de la senescencia, si bien los alelos importunos no se seleccionaron con ese fin. Los genes del envejecimiento —los gerontogenes— se habrían instalado cómodamente en los cromosomas humanos porque la selección natural no habría podido evitar su difusión. Los alelos perjudiciales persistirían en una especie si sus efectos nocivos no se evidenciaban hasta avanzada ya la madurez sexual.

Y lo que es peor aún, como propuso George C. Williams, de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook en los años cincuenta, los alelos que devienen destructivos en etapas tardías de la vida podrían adoptarse fácilmente si comportaban alguna mejora adaptativa en edad temprana; dualidad de efecto que se conoce por pleiotropía antagónica. Los genes que especifican las instrucciones para la síntesis de las hormonas de la reproducción podrían muy bien encontrarse dentro de ese grupo traicionero. Steven Austad, de la Universidad de Harvard, propone que el riesgo creciente de cáncer de mama con la edad de la mujer podría co-



2. LOS FIBROBLASTOS NORMALES (*azul*) o células del tejido conjuntivo, procedentes de tejido humano (*izquierda*), aumentan de tamaño a medida que envejecen en una placa de cultivo (*derecha*). Al mismo tiempo, su ritmo de proliferación se hace cada vez más lento,

Florilegio de cambios asociados con la edad

Donde se resumen las alteraciones anatómicas y fisiológicas que suelen presentarse en el hombre conforme va avanzando su edad. Conviene señalar que ciertos monos y otros mamíferos, incluidos los roedores, sufren bastantes cambios de ésos.

	FUNCION DE ORGANOS	TERMORREGULACION	INMUNIDAD	REPRODUCCION	VISION
CAMBIOS FRECUENTES EN EL SEGUNDO TERCIO DE LA VIDA				Aparición de la menopausia en la mujer	
CAMBIOS FRECUENTES EN EL TERCIO FINAL DE LA VIDA	Desciende la capacidad funcional del corazón, pulmón y riñón en condiciones extremas	Disminuye la capacidad para enfrentarse a cambios en la temperatura ambiental	Declina la capacidad del organismo para combatir la infección; aumentan las respuestas autoinmunitarias	Desciende la fertilidad masculina.	Pérdida de capacidad de enfoque

FUENTE: *Caleb E. Finch, de la Universidad de California del Sur*



hasta que dejan de dividirse por completo. Varios laboratorios han identificado ya muchos de los genes que parecen controlar la pérdida de la capacidad replicativa. Lo que esos hallazgos significan en relación con el organismo humano se desconoce por el momento.

rroborarlo: la exposición prolongada a los estrógenos requeridos para la fertilidad podría predisponer el tejido de la mama a la malignidad.

Abundando en esa idea, Caleb E. Finch, de la Universidad de California del Sur, ha comprobado que hormonas normales y otras moléculas reguladoras provocaban trastornos en los propios tejidos y células donde desarrollaban su acción fisiológica específica. El hipotálamo y la hipófisis controlan la función ovárica, pero también parecen contribuir al envejecimiento del ovario, al menos en los roedores. A su vez, el ovario, que envía señales al hipotálamo y a la hipófisis, parece promover el envejecimiento de esos órganos. Tales propiedades pleiotrópicas, supone Finch, constituyen una muestra de que el envejecimiento resulta de la actividad de los sistemas nervioso y endocrino y de su mutua interacción.

Ahora bien, los genes que refuerzan la adaptación precoz no tienen por qué volverse directamente dañinos en época posterior y degradar irremisiblemente al organismo. Para Thomas B. L. Kirkwood, del Consejo de Investigaciones Médicas en Londres, y Richard G. Cutler, del Instituto Nacional de Envejecimiento, la senescencia podría aparecer en una población siempre que los sistemas de mantenimiento del organismo, sometidos a control genético, asegurasen la supervivencia del individuo para perpetuar la especie, aunque fueran incapaces de sostener el funcionamiento ininterrumpido del mismo.

Un soma desechable

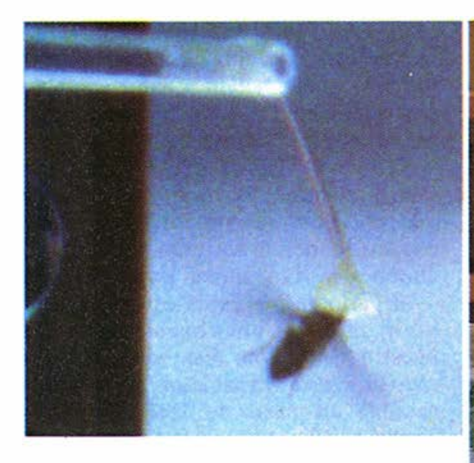
Kirkwood sugiere que la mayoría de los animales no ha adquirido, a través de la evolución, sistemas de mantenimiento que aseguren su inmortalidad, porque se hubiera derrochado una energía que se invertiría mejor en la reproducción: al existir la probabilidad del riesgo de muerte violenta, la especie haría bien en invertir en sistemas de protección que garanticen el vigor juvenil durante ese período, pero no más allá de él. El resto del suministro energético de un organismo puede dirigirse entonces hacia la promoción de una fertilidad óptima. Apoyado en la táctica industrial de invertir poco en la durabilidad de los artículos que habrán de utilizarse durante poco tiempo, Kirkwood llama a su modelo la teoría del soma desechable. En este caso, serían las células somáticas, las células no reproductoras, las que en último término serían las prescindibles. Por contraste, una fracción de las células germinales debe conservar la capacidad de autorrepararse perfectamente, ya que de otro modo la especie se extinguiría.

Kirkwood estima que la inversión que el hombre ha hecho para proteger el soma proporciona suficiente capacidad defensiva para asegurar el ánimo de vivir quizá para 40 años —el período que cabía esperar sobrevivir durante una buena parte de nuestra evolución. Esa inversión incluiría cierta capacidad de recuperación, en caso de lesiones accidentales. Probablemente, nos las arreglamos para seguir adelante en la madurez y después aprovechando las reservas. Como nuestra capacidad de recuperación se extingue progresivamente, la respuesta al estrés ambiental se hace cada vez más difícil, hasta que al fin nos encontramos con la muerte.

La hipótesis del soma desechable explica la idea que atribuye el envejecimiento a la destrucción causada por moléculas producidas en el curso normal de la vida, incluidos los radicales libres de oxígeno, según propuso, mediados los cincuenta, Denham Harman, de la Universidad de Nebraska. Muchas reacciones biológicas generan radicales libres. Al llevar un electrón no apareado, tales radicales pueden oxidar —y consiguientemente dañar— proteínas, ADN, lípidos y otras moléculas por todo el organismo. Pueden dar lugar también a más radicales y agentes oxidantes emparentados, como el agua oxigenada o peróxido de hidrógeno, por lo que se ponen en marcha largas cadenas de actividad destructiva. Harman adelantó que una acumulación de lesiones oxidativas irreversibles en células y tejidos en todo el cuerpo podría desencadenar el envejecimiento.

La hipótesis del soma desechable explica también la idea de Anthony Cerami, para quien la glucosa, el com-

VELOCIDAD DE REACCION	TUMORES	HORMONA DEL CRECIMIENTO	GRASA	ARTERIAS CORONARIAS Y CEREBRALES	HUESO	ARTICU-LACIONES	NEURONAS GIGANTES DEL CEREBRO
	Frecuente aparición de cáncer en los órganos de la reproducción		Aumento del almacenamiento	Suele aparecer cierto grado de aterosclerosis	En la mujer se instaura la osteoporosis		
Lentitud de la respuesta física o mental ante estímulos específicos		Disminuye la secreción		Aterosclerosis diseminada		Alteraciones artríticas	Algunas aumentan de tamaño; otras se atrofian





3. MICHAEL ROSE, de la Universidad de California en Irvine, ha conseguido prolongar la vida media de la mosca de la fruta *Drosophila melanogaster* (*fotografía de la izquierda*) mediante cruces selectivos. El insecto que aparece en la fotografía está enganchado a un sedal mediante una gota de pegamento para la realización de un experimento en el que Joseph L. Graves demuestra que las moscas de larga vida son más fuertes que los individuos normales: pueden mantener el vuelo durante más tiempo dentro de un amplio margen de humedad y temperatura.

bustible principal del organismo humano, constituiría otro factor decisivo en el proceso de envejecimiento. Cerami ha demostrado que la glucosa altera lentamente las proteínas de vida prolongada, como el colágeno, haciendo que queden entrelazadas entre sí por puentes intermoleculares; a tal glicosilación, afirma, podría deberse el endurecimiento del tejido conjuntivo y del miocardio que se produce con el paso del tiempo. Según el modelo del soma desechable, estos y otros procesos de desgaste podrían contribuir al envejecimiento si superan la capacidad de nuestros sistemas de prevención y de reparación para combatirlos. Pero la prueba de fuego de esta hipótesis evolutiva radicará en la identificación de los genes que controlen las moléculas que frenan o que promueven la senescencia.

Claves genéticas

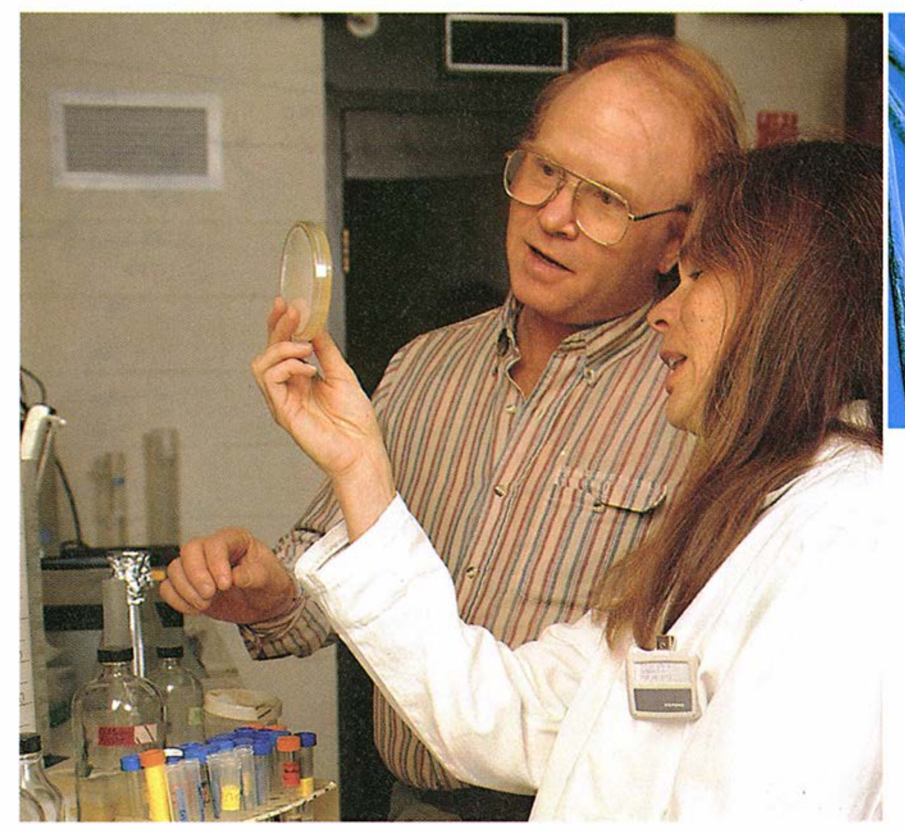
Obtenidas las moscas reforzadas, el grupo de Rose comparó las proteínas sintetizadas por los insectos normales y los experimentales: muchas de las moscas longevas producen una versión extraordinariamente activa de la enzima antioxidativa superóxido dismutasa, lo que significa que albergan una variante del gen especificador de la enzima; sintetizan, en particular, una versión muy eficiente de la forma de la enzima que se da en el citoplasma de las células. En la mosca de la fruta, como en el hombre y otros organismos, las superóxido dismutasas defienden contra el daño oxidativo, al neutralizar el superóxido, un radical libre muy dañino. De esa diferencia genética hemos de colegir que las moscas normales envejecen antes porque sus defensas frente a los radicales libres no son tan eficaces como las sometidas a una reproducción selectiva.

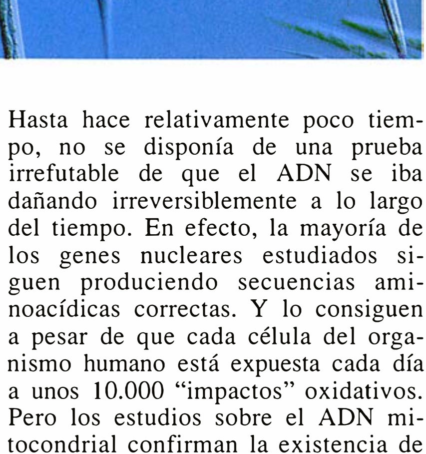
La superóxido dismutasa producida por la mosca de la fruta es, sin duda, uno de los muchos factores que influyen en la celeridad de su envejecimiento. Rose y Joseph L. Graves han comprobado que las moscas longevas son más resistentes a la privación del alimento porque almacenan más grasa.

El grupo de Thomas E. Johnson, de la Universidad de Colorado, lleva años trabajando en la reproducción selectiva de *Caenorhabditis elegans*, nemátodo del suelo; ya ha conseguido prolongar la vida de la especie provocando mutaciones genéticas al azar. Está centrado en la identificación de los genes que se expresan diferencialmente en los grupos normales y en los longevos (transcriben diferencialmente el ADN en ARN, que después se traduce en proteína). En 1988 anunció que la mutación de un único gen, el *age-1*, aumentaba el período de vida media del *C. elegans* en un 70 por ciento. Los nemátodos mutantes producen niveles elevados de antioxidantes (superóxido dismutasa citoplasmática y catalasa) y son más resistentes al paraquat, herbicida que induce la generación del radical superóxido.

La mutación del gen *age-1* parece inactivar el gen, lo que significa que la proteína codificada por él deja de producirse. Si la eliminación de una proteína conduce a un incremento de la producción de antioxidantes, es posible entonces que sean las proteínas normales las que inhiban la producción de esas sustancias. Johnson considera que la inhibición es efecto no deseado de alguna función pleiotrópica importante todavía por descubrir.

Michael Jazwinski, del hospital clínico de la Universidad estatal de Louisiana, investiga la senescencia en la levadura de cerveza (*Saccharomyces cerevisiae*). Ha identificado varios genes que prolongan su vida; así, *LAG1* (del inglés "longevity assurance gene 1", el gen 1 que garantiza la longevidad), más activo en las células jóvenes que en las viejas. Al inducir una actividad *LAG1* extra, después del declive normal de su expresión, se le alarga la vida hasta un tercio. Y lo que es más importante, las células de levadura provectas que llevan el gen "extra-activo" no se tornan inmortales (como ocurre con las células cancerosas en los organismos pluricelulares); sencillamente se mantienen jóvenes durante un





4. THOMAS E. JOHNSON, de la Universidad de Colorado, que aparece examinando una placa de petri junto a una de sus ayudantes, ha prolongado la vida de otro organismo pluricelular: el pequeño nemátodo del suelo *Caenorhabditis elegans* (*fotografía de la derecha*). Johnson y sus colaboradores consiguieron esta proeza por dos caminos distintos: mediante cruces selectivos de ejemplares de probada longevidad y mediante la producción de mutaciones en un gen, conocido con el nombre de *age-1*. El grupo se propone ahora clonar el gen *age-1*.

período más prolongado. Jazwinski, que desconoce cuál puede ser la función de la correspondiente proteína, ha descubierto que un gen similar se expresa en ciertas células humanas.

Descubrimientos radicales

Aunque la función del *LAG1* siga siendo un misterio, el descubrimiento de que el antioxidante superóxido dismutasa parece afectar a la longevidad tanto en la mosca de Rose como al pequeño nemátodo de Johnson encaja con el entusiasmo creciente por la teoría de los radicales libres de Harman.

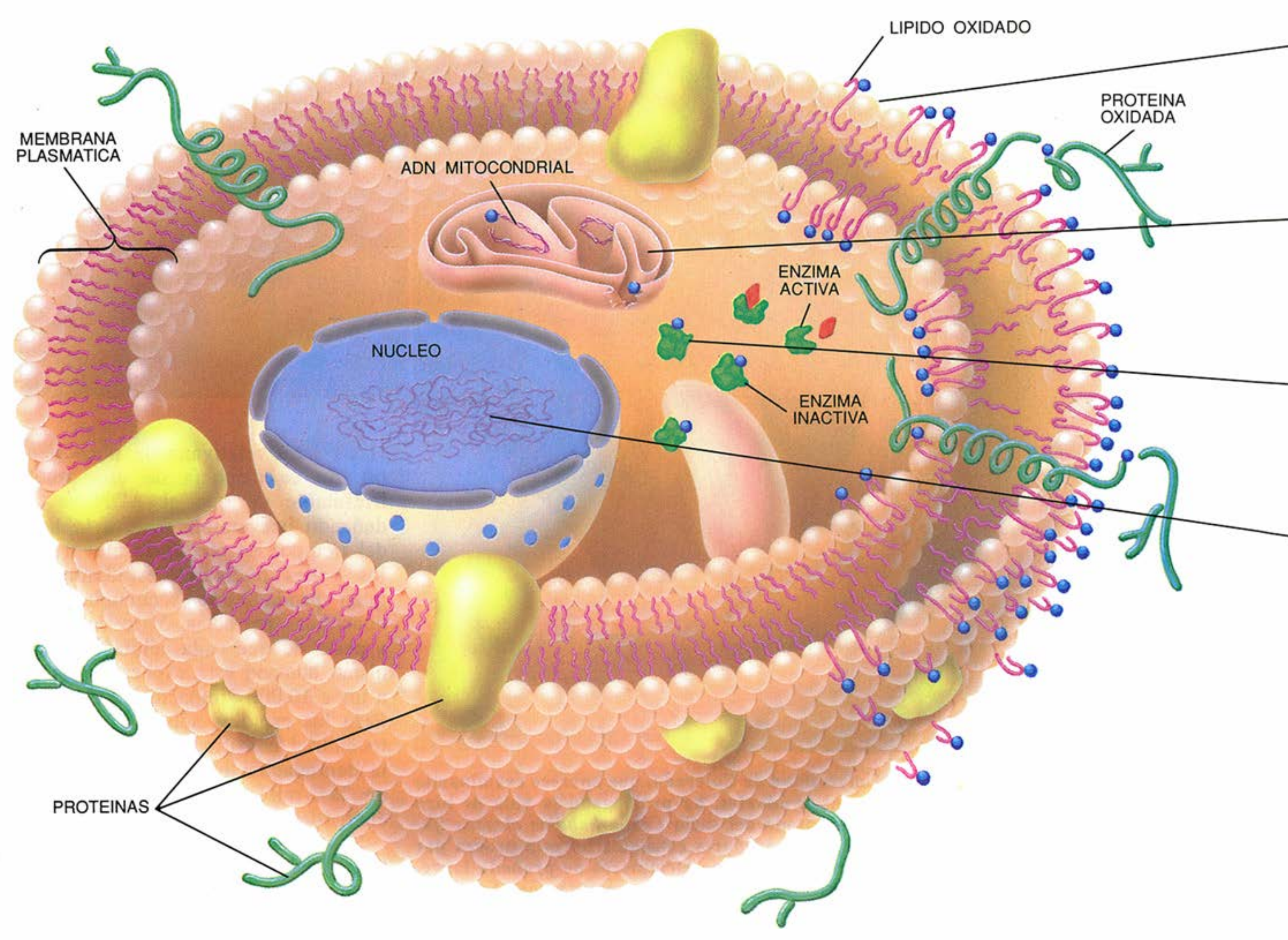
Una buena parte de los datos disponibles hasta el momento acerca de los radicales libres se basa más en correlaciones que en demostraciones definitivas de causa y efecto. Por ejemplo, si el daño causado por radicales libres y no reparado fuese una causa de envejecimiento, los animales con una tasa metabólica alta —es decir, que queman oxígeno con una relativa rapidez— tendrían que vivir menos que los que consumen oxígeno con más lentitud. Los metabolizadores rápidos serían los que producirían radicales libres con más rapidez. En efecto, el metabolismo basal, o de reposo, de una especie es inversamente proporcional a la duración de su vida; el ratón tiene un metabolismo mucho más elevado que el hombre, y raramente su vida se alarga más allá de los tres años.

Cutler, del Instituto Nacional de Envejecimiento, ha encontrado razones nuevas que apoyan esa idea. Ha descubierto que los tejidos del hombre y de otras especies longevas producen en general más superóxido dismutasa y son más resistentes a la oxidación. El hombre envejecería porque esa protección especial frente a la oxidación sería insuficiente para protegerle indefinidamente. También se piensa que las moléculas oxigenadas reactivas participan en el desarrollo de muchas afecciones de aparición frecuente en el envejecimiento, incluidos el cáncer, la artritis y la aterosclerosis. Son varias las enfermedades en las que están implicados los lípidos oxidados, que se sabe que se acumulan en células viejas.

Algunos de los datos más convincentes proceden, sin embargo, de estudios acerca del ADN y proteínas. Hasta hace relativamente poco tiempo, no se disponía de una prueba irrefutable de que el ADN se iba dañando irreversiblemente a lo largo del tiempo. En efecto, la mayoría de los genes nucleares estudiados siguen produciendo secuencias aminoacídicas correctas. Y lo consiguen a pesar de que cada célula del organismo humano está expuesta cada día a unos 10.000 "impactos" oxidativos. Pero los estudios sobre el ADN mitocondrial confirman la existencia de la degradación irreversible, al menos en las mitocondrias, las centrales energéticas de la célula.

Se abordó el examen del ADN mitocondrial (que codifica una docena de proteínas que la mitocondria necesita para su funcionamiento), en parte, porque se había visto que la capacidad de los orgánulos para generar energía declinaba con la edad. Sospechábase del ataque de los radicales libres al ADN, porque las mitocondrias son la fuente principal de radicales libres en el organismo y porque el ADN mitocondrial es vulnerable a la injuria oxidativa: la tasa de oxidación del ADN es bastante más elevada en la mitocondria que en el núcleo. El material genético se muestra vulnerable porque carece de histonas, las proteínas que se unen al ADN nuclear y lo protegen; los propios genes mitocondriales están apenas defendidos por las enzimas que, como se ha comprobado recientemente, escinden y reemplazan los trozos de ADN oxidados en el núcleo celular.

Estas observaciones sugieren la posibilidad de que una agresión oxidativa continua sobre el ADN mitocondrial podría entorpecer, lenta e inexorablemente, la actividad de las mitocondrias en el adulto que envejece normalmente. Afectado un número suficiente de orgánulos, las células en las que residen quedarían ayunas de energía. Y cuando se interesara una cifra notable de células de un órgano, su función comenzaría a declinar.



5. EL ATAQUE OXIDATIVO contra proteínas (*tonalidades de verde*), lípidos (*rosa*) y ADN (*azul de lavanda*) —indicado de manera esquemática por la unión de una pequeña esfera de color azul brillante— puede degradar la función de muchos constituyentes celulares (sólo se representan algunos). Una de las teorías principales sobre el envejecimiento, propuesta a mediados de los años cincuenta, sostenía que el organismo humano no se deteriora a lo largo del tiempo debido a que en su interior se forman agentes oxidativos potencialmente destructivos conocidos con el nombre de radicales libres.

Gino A. Cortopassi y Norman Arnheim, de la Universidad de California del Sur, respaldaron en 1990 ese planteamiento. Descubrieron en el ADN mitocondrial de las células de corazón y cerebro del adulto de edad avanzada un defecto que no se ha observado en el tejido fetal. Y, según Douglas C. Wallace, de la Universidad de Emory, parece probable la degradación, en las personas mayores, de un número significativo de moléculas de ADN mitocondrial; acaricia también la idea de que algunas enfermedades crónicas que suelen presentar en la vejez se hallen relacionadas con el fallo mitocondrial, incluidas la diabetes de instauración tardía y las enfermedades de Parkinson y de Alzheimer.

A finales de los años ochenta, se desarrolló una técnica para determinar los grupos carbonilo, un subproducto ordinario de la oxidación de las proteínas. Las mediciones revelaron que la cantidad de proteínas oxidadas en diversos tipos celulares del organismo humano aumentaban exponencialmente con la edad del donante. También se han obtenido datos llamativos al examinar fibroblastos —células que producen colágeno y otros constituyentes del tejido conjuntivo— procedentes de pacientes con afecciones genéticas raras, que causan un envejecimiento prematuro. Las personas que padecen progeria y el síndrome de Werner presentan niveles de grupos carbonilo extraordinariamente más elevados que los individuos normales de su misma edad. Según algunos cálculos, hasta una mitad de las proteínas, incluidas muchas enzimas, de una persona de edad avanzada podrían quedar inactivas por culpa de las alteraciones oxidativas. Ese grado de oxidación, añade, conduciría casi con certeza a la senescencia.

En 1991, el grupo de John M. Carney, del hospital clínico de la Universidad de Kentucky, ofrecía los primeros datos directos de la degradación de la función fisiológica por ataque de los radicales libres sobre las proteínas. Demostraron que el nivel de proteína oxidada aumentaba en el cerebro del jerbo conforme éste envejecía; al tratarlo con fenilbutilnitrona (FBN), la oxidación descendía hasta niveles propios de los individuos jóvenes. También, en otro experimento, no repetido aún, administraron FBN a jerbos seniles durante dos semanas. Antes del tratamiento, los animales más viejos, sometidos a pruebas en un laberinto, presentaban ciertas limitaciones de la memoria a corto plazo al compararlos con los individuos más jóvenes. Al final del período de tratamiento, los más viejos se comportaron como los más jóvenes (aunque al interrumpir el tratamiento, la mejoría en la realización de la prueba se desvaneció).

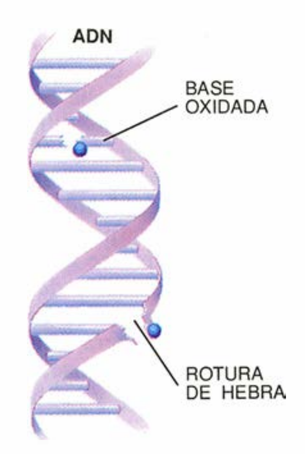
Los datos acerca de los radicales

MEMBRANAS
La oxidación de lípidos y proteínas puede minar la integridad y la permeabilidad, estrictamente regulada, de la membrana plasmática y de las membranas que rodean los orgánulos celulares. Las células lesionadas podrían segregarse.

MITOCONDRIAS
Cuando estos orgánulos, que constituyen el lugar principal de formación de radicales libres, quedan también gravemente dañados, las células pueden morir por falta de energía. Las membranas y el ADN mitocondrial están predispuestos a la oxidación.

ENZIMAS
Muchas enzimas pueden inactivarse por culpa de la oxidación de sus centros activos. El ataque de los radicales libres degrada otras proteínas intracelulares y extracelulares.

CROMOSOMAS
El ataque de los radicales libres a las moléculas del ADN, el constituyente fundamental de los cromosomas, atenta contra la cuantía de proteína, o su idoneidad, sintetizada por la célula.



libres apoyan, pues, la posibilidad de que el envejecimiento sea consecuencia de nuestra incapacidad para enfrentarnos con el desgaste, y no porque nuestros cromosomas contengan un programa diseñado para matarnos. Pero la idea de una muerte específicamente programada no se ha descartado por completo.

Envejecimiento en una placa de petri

Afirmábase en los años cincuenta que las células humanas capaces de proliferar en el organismo se replicarían indefinidamente en los cultivos celulares. La gente envejecía y moría, no por la existencia de un programa intrínseco que determinara el declive celular, sino a resultas de procesos que trascendían el plano celular para ubicarse en un nivel superior dentro de la organización fisiológica.

El dogma se vino abajo cuando

Defensas ante las lesiones oxidativas

Defensas dispares evitan o reparan las injurias oxidativas de las moléculas producidas por los radicales libres. Son insuficientes en su conjunto. Las observaciones revelan que algunas de estas defensas pierden fuerza con la edad.

	CLASE	MOLECULA	ACTIVIDAD
ANTIOXIDANTES (neutralizan los radicales libres o limitan su actividad)	**ENZIMAS**	Superóxido dismutasas	Convierten el radical superóxido $(O_2^{\cdot -})$* en agua oxigenada (H_2O_2)
		Glutatión peroxidasas y catalasas	Convierten el agua oxigenada en agua inocua y oxígeno molecular (O_2)
	OTROS	Vitamina E y beta caroteno	Reaccionan con los radicales libres, evitando, por tanto, que ataquen los componentes celulares; son liposolubles y por eso pueden proteger las membranas
		Acido úrico y vitamina C	Reaccionan con los radicales libres en el citoplasma
		Quelantes de metales	Evitan que el hierro, cobre y otros metales de transición catalicen reacciones de oxidación
SISTEMAS DE REPARACION (degradan, reparan o sustituyen moléculas alteradas)	**REPARACION DE PROTEINAS**	Proteinasas	Escinden proteínas oxidadas
		Proteasas	Cortan los productos de la actividad de las proteinasas
		Peptidasas	Trocean los productos de la actividad de las proteasas; los aminoácidos pueden reciclarse entonces para la síntesis de nuevas proteínas
	REPARACION DE LIPIDOS	Fosfolipasas	Eliminan las partes alteradas de los lípidos de membrana oxidados de modo que otras enzimas puedan reparar las zonas dañadas
		Acetiltransferasas	Al parecer reemplazan los aminoácidos eliminados de los lípidos
		Glutatión peroxidasa y transferasa	Ayudan a la reparación de los ácidos grasos sin eliminar zonas amplias de la membrana
	REPARACION DEL ADN	Exonucleasas y endonucleasas	Eliminan segmentos de ADN alterados
		Glicosilasas y polimerasas	Rellenan los huecos que dejan las exonucleasas y endonucleasas
		Ligasa	Suelda los extremos de la hebra una vez corregidos los desperfectos

*El punto junto al O_2 en el radical superóxido indica la presencia de un electrón no apareado

FUENTE: *Kelvin J. A. Davies de la Facultad de Medicina de Albany*

Leonard Hayflick y Paul S. Moorhead dieron a conocer en 1961 que los fibroblastos humanos normales llevaban escrita la limitación del número de veces que podían dividirse: el número de veces que las poblaciones de fibroblastos procedentes de un embrión pueden duplicarse está prefijado, y es de unas cincuenta. La existencia del límite de Hayflick ha recibido amplia confirmación, y el estudio de la razón por la que se detiene la proliferación celular puede orientarnos en la investigación sobre la degradación general del individuo.

La probabilidad de que el envejecimiento de las células *in vitro* guarde relación con el envejecimiento del organismo se ha reforzado en los últimos años: la capacidad de las células para duplicarse desciende progresivamente con la edad del donante; los fibroblastos de pacientes con el síndrome de Werner no pueden replicarse tantas veces como las células procedentes de individuos normales de la misma edad, y, por último, todos los tipos celulares humanos estudiados hasta le fecha tienen sus límites de proliferación propios en los cultivos. Asimismo, se han identificado los genes cuya expresión cambia sistemáticamente a medida que los fibroblastos en cultivo pierden su capacidad de duplicarse —tal como sería de esperar, si existiera un programa para el envejecimiento.

Se dispone ya de datos que indican que en los cromosomas 1 y 4 existen genes que participan en la pérdida de la capacidad replicativa. Judith Campisi ha determinado que la desconexión del gen c-*fos* precede y probablemente afecta a muchos de los otros cambios descubiertos. Cuando se silencia definitivamente al c-*fos*, los fibroblastos dejan de replicar su ADN. Por consiguiente, también dejan de dividirse. Se sospecha que el propio c-*fos* puede acallarse para siempre mediante un proceso más primario, a saber, mediante un inhibidor celular que impida la iniciación de la síntesis del ADN.

¿Tienen los telómeros algo que ver? Calvin B. Harley, de la Universidad McMaster de Ontario, Carol W. Greider, del Laboratorio Cold Spring Harbor, y sus respectivos colaboradores han visto que la longitud de los telómeros desciende progresivamente en las células somáticas que se dividen en el organismo, y lo mismo sucede durante el envejecimiento de los fibroblastos en cultivo. Además, la longitud del telómero es un mejor indicador del potencial de división que la edad del individuo del que proceden las células.

Dicho acortamiento obedece a un extraño desperfecto en la maquinaria responsable de la duplicación del ADN durante la división celular. Siempre que se produce una nueva copia de ADN se elimina un pequeño fragmento de cada telómero. Estos hallazgos dan a entender que el telómero podría ser el reloj que determina la pérdida de la capacidad proliferativa de las células. Gran interés tiene también la observación de Harley y Greider de que la longitud del telómero se mantiene, si no está ligeramente aumentada, en los espermatozoides y en las células transformadas o inmortalizadas. Esa estabilidad podría explicar por qué las células germinales normales y las células malignas no pierden su capacidad replicativa. Podría, pues, suceder que el organismo entrara en decadencia cuando los órganos pierden su capacidad reparadora de las células dañadas.

Los críticos aducen que la gente no muere porque sus fibroblastos dejen de dividirse; la capacidad de división celular dista aún de extinguirse en el momento en que su "propietario" perece. Los escépticos señalan que los estudios de senescencia replicativa no pueden arrojar mucha luz sobre los procesos que conducen al deterioro de las células que no se dividen, en particular neuronas y células del miocardio, que operan admirablemente durante años.

Los cambios genéticos que se observan en los fibroblastos, replican otros, representan sólo un aspecto del proceso de envejecimiento, aunque un aspecto significativo, y citan el ejemplo del revestimiento unicelular del endotelio en los vasos sanguíneos: si las células endoteliales dentro de un área pequeña de un vaso hubieran perdido la capacidad de proliferación, y desaparecieran o se alterara su función, eso podría ser el inicio de los procesos que conducen a la aterosclerosis. La merma de capacidad proliferativa parece ser un problema del sistema inmunitario.

En busca de una teoría común

¿Cómo reconciliar los datos acerca de los fibroblastos con las hipótesis evolutivas? Para muchos, una limitación de la capacidad de proliferación puede haber surgido no como un programa letal, sino como una defensa frente al cáncer. La pérdida de la capacidad proliferativa podría, pues, ser otro ejemplo de pleiotropía antagónica. El "programa" que nos ayuda a defendernos contra el cáncer evita también que seamos inmortales. Aunque sea mucha la gente que acabe enfermando de cáncer, nuestra resistencia intrínseca nos hace significativamente menos proclives a los tumores que muchos otros animales.

A pesar del extraordinario progreso conseguido en la investigación de las células en cultivo, los radicales libres, los genes determinantes de la longevidad y otras vías prometedoras, el proceso de envejecimiento en el hombre continúa siendo una caja negra. A lo que hay que añadir la confusión provocada por el hecho de que los cambios relacionados con la edad no ocurran de manera uniforme, ya sea entre individuos (que difieren en susceptibilidad a afecciones específicas y en su exposición a los distintos tipos de estrés ambiental), ya sea entre células.

Saber con exactitud cuánto podrá extenderse la vida intentando echar remiendos en el proceso de envejecimiento, es algo que queda reservado a la imaginación de cada uno. Jazwinski, por citar a alguien, se lleva la palma a la hora de especular. Afirma que la duración máxima posible de la vida, que en la actualidad se cifra en unos 120 años, podría llegar a alcanzar los 400 años. Piensa incluso que el mortal medio que reciba el tratamiento dentro de unos 30 o 50 años, por decir una fecha, es probable que se beneficie de unos 30 años adicionales de vida.

Por supuesto, la prolongación de la vida, aunque fuera sólo eso, podría tener profundas consecuencias sociales, económicas y ambientales. Esta posibilidad plantea una cuestión que parece recibir escasa atención sistemática en la actualidad, y es si se debería o no intentar esa ampliación.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

VITALITY AND AGING: IMPLICATIONS OF THE RECTANGULAR CURVE. James F. Fries y Lawrence M. Crapo. W. H. Freeman and Company, 1981.

MODERN BIOLOGICAL THEORIES OF AGING. H. R.Warner, R. N. Butler, R. L. Sprott y E. L. Schneider. Raven Press, 1987.

LONGEVITY, SENESCENCE, AND THE GENOME. Caleb E. Finch. University of Chicago Press, 1990.

MOLECULAR BIOLOGY OF AGING: PROCEEDINGS OF A UCLA COLLOQUIUM, HELD AT SANTA FE, N. M., MARCH 4-10, 1989, dirigido por Caleb E. Finch y Thomas E. Johnson. Wiley-Liss, 1990.

REVIEW OF BIOLOGICAL RESEARCH IN AGING, vol. 4, dirigido por Morton Rothstein, Wiley-Liss, 1990.

EVOLUTIONARY BIOLOGY OF AGING. Michael R. Rose. Oxford University Press, 1991.

Ciencia y empresa

Vuelta a las raíces

Farmacopea vegetal

Desde la cocaína hasta la quinina, alrededor de una cuarta parte de los medicamentos recetados contienen al menos un componente de origen vegetal. Es cierto que en los últimos años las plantas iban perdiendo prestigio en las grandes compañías farmacéuticas ante las nuevas ideas que procedían de los microbios o variantes extraídos de las enormes bases de datos de productos químicos sintéticos. Hoy, sin embargo, la farmacia vuelve a sus raíces, y los botánicos de nuevo rebuscan con avidez en los campos y bosques del mundo para hallar plantas que proporcionen nuevos fármacos.

Existe un doble aliciente: un bono "verde" para las relaciones públicas y la posibilidad de descubrir un nuevo taxol, tratamiento para el cáncer de ovarios que originariamente se extraía de la corteza del tejo del Pacífico. Los botánicos estiman que sólo se ha explorado un 10 por ciento o menos de las 250.000 especies vegetales.

En una selección al azar puede llegar al mercado una molécula de cada 10.000. Los métodos automatizados basados en enzimas y otros indicadores químicos permitirían a una empresa someter a prueba hasta 150.000 muestras anuales, cientos de veces más de lo que era posible ensayando los productos químicos en cobayas. Entre los interesados se encuentra Monsanto, que ha contratado con el Jardín Botánico de Missouri el suministro de varios miles de plantas, tanto de los EE.UU. como de los países tropicales. Merck & Co. tiene un acuerdo con el Instituto de Botánica Económica del Jardín Botánico de Nueva York para recibir plantas de todo el mundo. Biotics, una pequeña y activa compañía inglesa enlazada con la Universidad de Sussex, adopta otro enfoque, el de "agente científico", y ha suministrado a Glaxo, SmithKline Beecham y otros, muestras y extractos químicos de plantas recogidas en los trópicos.

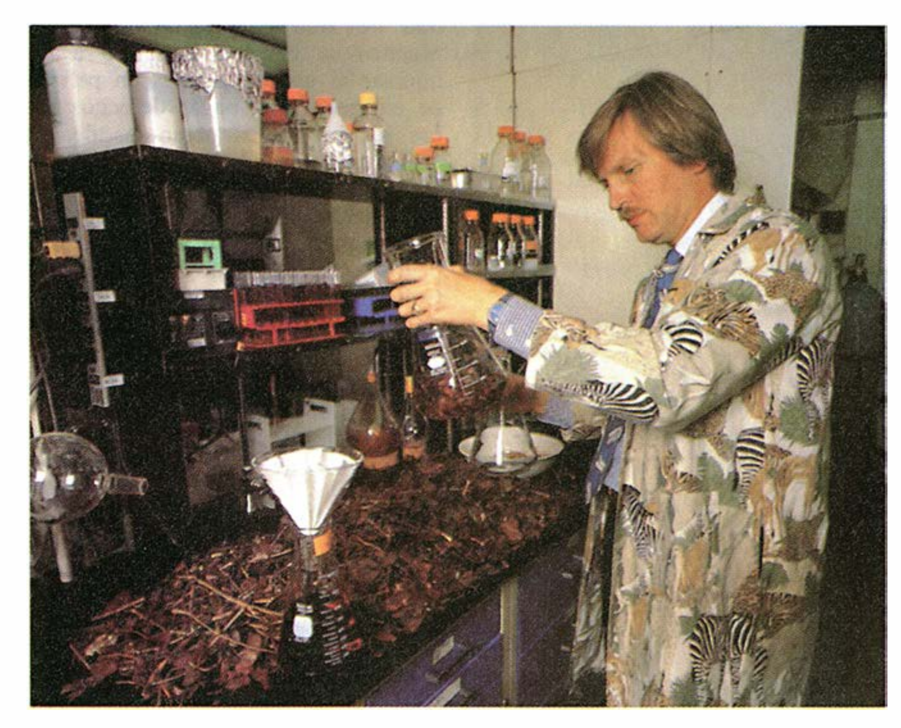
Muchos de los programas de selección de plantas son tan recientes que los indicios recogidos permanecen envueltos en el secreto que protege a los programas de desarrollo de medicamentos. Pero la envoltura se ha entreabierto para algunos de los resultados. SmithKline, por ejemplo, está ensayando ya en clínica un tratamiento de cáncer llamado topotecan. Una prueba enzimática ha permitido descubrir el compuesto de ese mismo nombre, que procede de un árbol chino, *Aamptotheca acuminata*. Su principio activo deriva de un producto químico extraído de un árbol que el Instituto Nacional del Cáncer (NCI) señaló veinte años ha como anticanceroso en potencia.

El NCI ha concentrado la investigación de nuevos fármacos extraídos de plantas. En 1986 montó el que tal vez sea el más extenso programa mundial de ensayos de plantas, sustituyendo a un proyecto de selección de 20 años iniciado en 1960. Aunque el trabajo inicial (que tomaba ratones como animales de experimentación) dio lugar al taxol, fue abandonado en 1980 ante la insuficiencia de resultados. La eficacia del taxol contra el cáncer de ovarios no se detectó hasta finales de los años ochenta.

Hasta ahora, el renovado esfuerzo del NCI ha reunido 23.000 muestras de 7000 especies en regiones tropicales, y ha identificado tres compuestos que parecen ser efectivos contra el SIDA *in vitro*. Estos tres compuestos han entrado en ensayos preclínicos de toxicidad.

Ha sido todo un hallazgo el extracto de cierta trepadora de la bóveda de la pluviselva del Camerún. Este miembro del género *Ancistrocladus* inhibe la replicación del virus del SIDA, y se encontró al intentar extender la búsqueda al espectro taxonómico más amplio posible. Hasta ahora no tenía utilidad médica, y todavía carece de nombre de especie. "Hay muy pocas personas en el planeta que hayan visto esta planta", dice James S. Miller, experto del Jardín Botánico de Missouri. Más recientemente, un grupo de la Universidad de Illinois que trabaja para el NCI descubrió un árbol malayo, el *Calophyllum lanigerum*, de eficaces propiedades contra el SIDA: de él se extrae la calanolida-A, que parece combatir una forma del virus del SIDA resistente al AZT.

En Samoa se descubrió otro fármaco con posibilidades antisídicas. Paul A. Cox, profesor de botánica de la Universidad Brigham Young, recogió el *Homalanthus nutans* por recomendación de las curanderas de allá, y de esa planta extrajo el NCI la prostratina, compuesto que protege las células inmunes contra su destrucción por el virus del SIDA. En Samoa, se utilizaba el *H. nutans* para curar la fiebre amarilla y otras enfermedades víricas.



Las plantas medicinales tradicionales han aportado nuevas ideas a Shaman Pharmaceuticals. Entre sus asesores hay curanderos del Tercer Mundo.

Varias compañías están volviendo a la medicina tradicional para concentrar su búsqueda de nuevos fármacos. Se proponen ensayar con sustancias que han mostrado actividad farmacológica durante cientos de años y que probablemente tienen muy poca toxicidad. Chemex Pharmaceuticals, de Fort Lee, fue recientemente autorizada por la Administración Federal de Alimentos y Medicamentos (FDA) a comercializar un tratamiento de las lesiones cutáneas precancerosas con un medicamento, el Actinex, extraído del arbusto de la creosota, cuyas aplicaciones médicas son ya tradicionales. Dos empresas fundadas en los últimos cinco años —Xenova, en Slough, Inglaterra, y Pharmagenesis, en Palo Alto— escudriñan la farmacopea tradicional china en busca de sugerencias interesantes.

Otra compañía, Shaman Pharmaceuticals, fue fundada por Lisa A. Conte, quien deseaba combinar la investigación de fármacos con los esfuerzos para preservar la flora de la pluviselva. La firma de Conte, radicada en San Carlos, California, recluta grupos de botánicos y médicos para Hispanoamérica, Africa y Asia en busca de plantas eficaces contra los virus, hongos o diabetes, o que den origen a sedantes o analgésicos. La condición para que una planta se someta a ensayo en Shaman es que se haya empleado en tres zonas geográficas distintas por lo menos. Según Conte, más de la mitad de las 200 especies que han pasado este examen preliminar muestran actividad contra la enfermedad especificada, mientras que la proporción no llega al uno por ciento en el caso de la inspección en masa.



La prospección biológica es una de las razones que atrae a los botánicos de todo el mundo hacia la pluviselva de Costa Rica.

En 16 meses, Shaman ha logrado traspasar un fármaco antivírico para la gripe infantil desde los curanderos rurales y los herbolarios urbanos de América Central y del Sur hasta las pruebas clínicas de la FDA sobre seres humanos. Mostrando fotografías médicas a los curanderos de Perú y Ecuador, los botánicos de Shaman obtuvieron también un agente antivírico que combate las infecciones de herpes resistentes a medicamentos. "Lo que Shaman está haciendo es aprovechar miles de años de pruebas clínicas en seres humanos", dice William L. Current, investigador jefe del grupo de enfermedades infecciosas de Eli Lilly. El pasado octubre, Lilly invirtió cuatro millones de dólares en acciones de Shaman y suscribió también un acuerdo de cuatro años para el desarrollo de medicinas efectivas contra enfermedades fungoideas.

Han pasado los tiempos en que una compañía podía producir medicamentos a partir de plantas que crecen en países en vías de desarrollo sin negociar el pago de derechos, como hizo Lilly en los años sesenta con la vincapervinca. Los extractos de esta planta producen vincristina y vinblastina, fármacos empleados contra la leucemia infantil y la enfermedad de Hodgkin, respectivamente. Shaman se ha comprometido a renunciar al uso de plantas en peligro de extinción y a pagar derechos sobre los beneficios obtenidos de los fármacos tanto al gobierno como a las comunidades nativas en las que se cosecha la planta, política que Lilly apoya. Shaman efectuará esos pagos a través de la Healing Forest Conservancy, fundación establecida por la empresa para promover la conservación de la pluviselva.

Menos corriente es el acuerdo de Merck para pagar un millón de dólares, durante un período de dos años, directamente al Instituto Nacional de Biodiversidad de Costa Rica (INBio) por la recogida de plantas, insectos y microbios. También se ha comprometido a pagar derechos por cualesquiera resultados que lleguen a convertirse en fármacos. Parte de estos desembolsos se dedicarán a preservar las zonas vírgenes de Costa Rica. La colaboración de Merck con una institución no lucrativa en un país cuyo producto nacional bruto es inferior a los beneficios anuales de esa empresa farmacéutica, ha despertado gran interés en otras naciones situadas entre los trópicos de Cáncer y de Capricornio.

Habeas corpus

Adán y Eva en banco de datos

Es difícil encontrar tanto el hombre como la mujer arquetípicos. Pero a la Biblioteca Nacional de Medicina (BNM) le basta con un solo ejemplar de cada sexo. Los candidatos ideales tendrían que ser de 20 a 60 años, de altura mediana, no demasiado delgados ni demasiado gruesos. Aunque no importa su raza u origen étnico, sí deben cumplir una condición más problemática: estar muertos y haber pasado las 12 últimas horas dentro de un refrigerador como preparación para ser seccionados en más de 1000 rebanadas por un equipo de médicos especialistas.

La BNM se ha embarcado en un programa de 18 meses en busca de los cadáveres ideales masculino y femenino, rebautizados con los nombres de Adán y Eva. Puede así iniciarse una era en la que los ordenadores rivalicen con los cadáveres como fuentes primordiales de información anatómica.

Para finales de año, la BNM habrá introducido en el ordenador cada milímetro de cadáver macho y hembra por medio de la tomografía informatizada (TI), las imágenes por resonancia magnética (IRM) y la fotografía normal. El resultado de este trabajo —el Proyecto *Ser Humano Visible*— constituirá el registro digital más completo de la totalidad de un cuerpo humano. "Hasta ahora, si la universidad A se ocupaba de la rodilla derecha, el instituto B se ceñía al oído izquierdo", dice Donald A. B. Lindberg, director de la BNM.

La principal aplicación de esta *Anatomía* de la era informática será, naturalmente, el estudio de la anatomía. Por primera vez, un alumno de medicina podrá hacer la "disección a la inversa" de un cadáver, reconstruyéndolo tras haberlo disecado en la pantalla. Un investigador podrá también inyectar un modelo matemático de crecimiento celular anormal en el hígado informatizado para examinar el desarrollo del tumor. La base de datos servirá también para proyectar prótesis y ayudar al cirujano a programar mejor una intervención. La imagen TI de un paciente puede compararse con las imágenes patrón

de Adán y Eva como modelos de ser humano normal.

Antes de iniciar el programa, los funcionarios de la BNM y otros expertos debatieron durante años la definición exacta de "normal", pero no llegaron a un consenso. Su imprecisa clasificación abarca ahora un hombre y una mujer de cualquier raza, de edad entre 20 y 60 años, menos de 1,83 metros de estatura y peso normal. "Teníamos que empezar por algo", dice Michael Ackerman, jefe de la rama de tecnología educacional de la BNM, que supervisa el proyecto. Pero aun con esta imprecisa definición, ha sido difícil hallar un cuerpo que no haya sufrido daños a lo largo de los trabajos de la vida diaria.

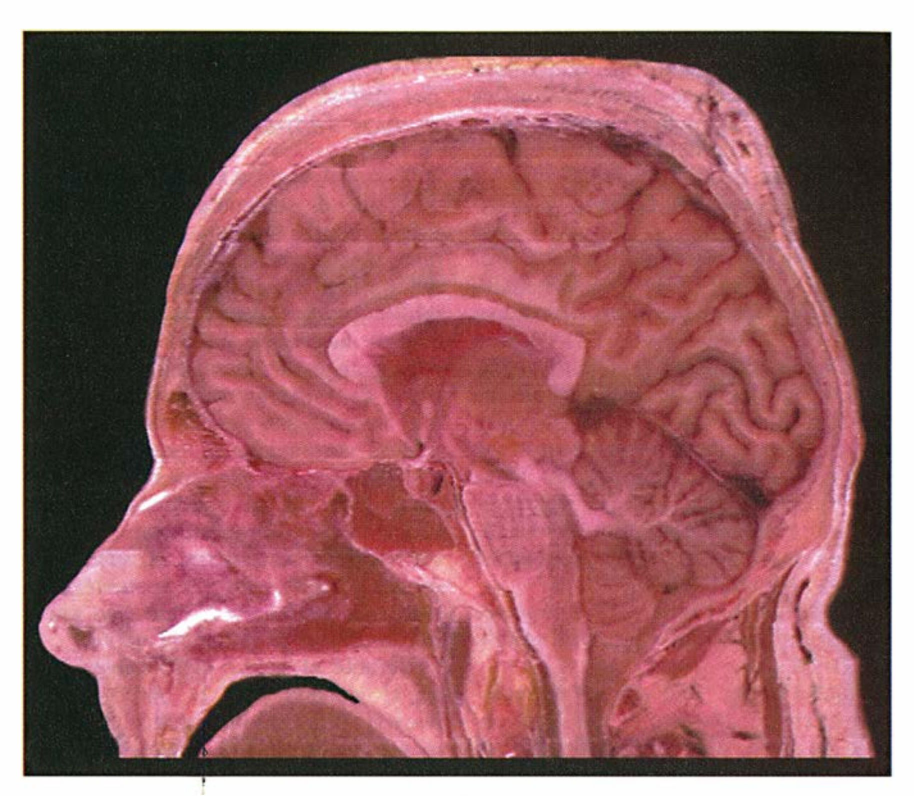
El Centro de Ciencias de la Salud de la Universidad de Colorado en Denver ha suscrito un contrato (palabra que utiliza deliberadamente el personal del proyecto) por más de 700.000 dólares para hallar varios cadáveres masculinos y femeninos. La BNM elegirá un Adán y una Eva entre los candidatos que el centro haya seleccionado.

La disección debería haber empezado el pasado julio. Pero hasta ahora sólo se han encontrado cinco cadáveres, tres varones y dos mujeres. Todos, excepto dos varones, presentan defectos. La conservación digital de uno de estos dos cadáveres congelados podría comenzar dentro de algunos meses, una vez que haya elegido el comité de revisión de la BNM.

Un buen candidato puede ser alguien que haya muerto de sobredosis, intoxicación por monóxido de carbono o alguna otra causa que no desfigure y, por supuesto, que haya ofrecido la donación de su cuerpo para la ciencia. El laboratorio de representación anatómica de Colorado empleará una fresadora que funciona a la manera de un cepillo de carpintero automatizado, cortando del cuerpo una rebanada de un milímetro de espesor cada vez. Al separar cada una de estas láminas, se fotografía la superficie recién descubierta, y todas las fotografías digitalizadas se almacenan luego en un ordenador con imágenes de IRM y TI tomadas antes de empezar el proceso de disección. Después, comenzará el verdadero trabajo. Otro contratista terminará la faena identificando y clasificando cada una de las rebanadas digitales, proyecto que durará años y cuyo coste se estima en 10 millones de dólares.

La base de datos final estará compuesta de 50 gigabytes de información digital, suficiente, si no se comprimiera, para llenar más de 80 discos compactos. En lugar de distribuir los datos en discos, la BNM tal vez tenga la opción de transferir la información a través de una red, financiada por el gobierno, que admitiría transmisiones a la velocidad relámpago de un gigabit por segundo.

En alguna fecha futura, Adán y Eva pueden tener progenie y quizá también progenitores. La BNM querría añadir cadáveres informatizados de niños, ancianos y enfermos a sus archivos. Mientras tanto continúa la búsqueda de unos pocos hombres y mujeres selectos que serán los recipiendarios de 50 gigabytes de fama.



Reconstrucción de una cabeza combinando 352 fotografías digitalizadas de cortes de tejidos. La Universidad de Colorado reconstruirá un organismo completo.

Adquisición de geometría

Ingeniería inversa

Desandar el camino desde una pieza manufacturada hasta su descripción en planos solía ser un proceso laborioso. Los ingenieros descomponían la pieza en porciones y tomaban cientos de medidas. Aun así, apenas si conseguían una primera aproximación de la forma y dimensiones precisas del original. Hoy día, una versión a escala industrial de la máquina de tomografía informatizada (TI) que descubre los tumores cerebrales, convierte esta tarea en algo casi tan fácil como hacer una radiografía médica.

Los datos sobre las dimensiones interiores y exteriores de una pieza manufacturada sirven de guía para construir planos informatizados bidimensionales o tridimensionales. No se ocasionan daños a la pieza ni se producen las distorsiones en la perspectiva espacial que tenían lugar cuando aquélla se cortaba en porciones. La exploración TI aporta información sobre los contornos de la pieza que puedan no haber estado en el plano original del fabricante o de los cuales solamente haya existido un modelo en madera o yeso. La imagen informática permite también elaborar un dibujo de una pieza que proceda de un suministrador, o incluso de un competidor.

El precio de las máquinas de TI, un millón de dólares o más, es demasiado alto para comprarlas con el solo fin de espiar los secretos de la competencia. De hecho, los tres principales fabricantes de máquinas industriales de exploración por TI en los EE.UU. venden menos de diez equipos por año. Se emplean, sobre todo, para medir las dimensiones de una pieza terminada, detectar sus defectos internos o elaborar dibujos de diseño asistido por ordenador (DAO) de piezas cuyos datos dimensionales todavía no están disponibles.

Boeing recurrió a la ingeniería inversa —o "adquisición de geometría", como eufemísticamente se denomina a veces— para crear de nuevo la rueda de cola de un avión Boeing 307 Stratoliner de 1940, que se es-

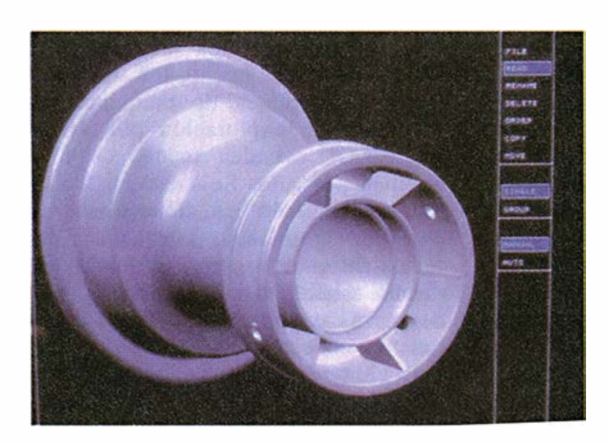
taba reacondicionando para la Institución Smithsoniana. Se obtuvieron por TI varios cortes bidimensionales de la rueda, equivalentes a "abrir la pieza y tenerla delante", como dice Richard H. Bossi, ingeniero investigador del grupo de Defensa y Espacio de la Boeing.

A continuación, un ingeniero proyectista extrajo los puntos dimensionales importantes de la sección transversal y utilizó un sistema DAO para formar una imagen maciza tridimensional. Partiendo de este dibujo se produjo una réplica de la rueda a mitad de tamaño por un proceso de estereolitografía. Mediante un láser ultravioleta, guiado por las coordenadas indicadas en el dibujo, se solidificaron las capas de plástico constitutivas del modelo.

No obstante, espiar a la competencia sigue teniendo un indudable atractivo.

John Cooper, uno de los ingenieros jefes de Desarrollo de Fabricación de Ford, dice que SMS construyó la imagen de las cabezas de los cilindros de aluminio de Toyota porque se parecían a un nuevo proyecto de Ford. Según él, la exploración permitió a los ingenieros de Ford determinar las posibilidades de la tecnología TI. "Era un ejemplo típico de la clase de pieza cuya imagen se desearía poseer", observa Cooper; "TI es el único medio que conozco para definir las características internas de una pieza sin cortarla en trozos".

Pese a todo, la TI no es todavía una herramienta normal en el rito anual de examinar los productos de la competencia. Pero a medida que estos procesos se automaticen más y el precio de su técnica baje, la ingeniería inversa hallará múltiples aplicaciones. Y la tentación de adquirir un poco de geometría comparativa será ciertamente una de ellas.



La ingeniería inversa de la rueda de cola de un Boeing 307 Stratoliner fue un proyecto realizado por el Grupo de Defensa y Espacio de Boeing.

Topología molecular

Su papel en el diseño de nuevos fármacos

Hasta el siglo XX, la búsqueda de nuevas sustancias con actividad farmacológica era una labor que requería, además de una buena dosis de fortuna, la realización de innumerables ensayos con extractos de sustancias naturales, en su mayoría de origen vegetal. Paul Ehrlich recibe el título de pionero en el desarrollo de una metodología para la obtención de nuevas sustancias, al lograr en 1910 el salvarsán, un compuesto arsenical sintetizado en un comienzo por sus propiedades colorantes, que demostró ser muy eficaz contra la sífilis. El propio Ehrlich hubo de acometer, sin embargo, innumerables ensayos antes de descubrir la sustancia activa.

Durante el medio siglo subsiguiente, el sistema para la obtención de nuevos fármacos consistió esencialmente en la realización de modificaciones en las fórmulas de las moléculas activas con el fin de mejorar sus propiedades. Pero en los años sesenta, merced a la introducción de los ordenadores en el campo farmacológico, se hizo evidente la necesidad de desarrollar procedimientos de diseño que descartaran, en lo posible, el componente aleatorio de los métodos al uso, exigencia que venía avalada, además, por el reconocimiento de la influencia de la estructura química en la acción farmacológica.

Aparecieron así los métodos RCEA (Relaciones Cuantitativas Estructura-Actividad) que sirvieron de base para el diseño de nuevas moléculas activas. Uno de los parámetros más utilizados en los primeros pasos de esa nueva orientación fue el coeficiente de reparto octanol/agua. (El coeficiente de reparto mide la lipofilia, es decir, la preferencia que una determinada sustancia muestra por disolverse en agua o en grasas.) En otros casos, se buscaban correlaciones con otras magnitudes más complejas (como la energía libre) con resultados dispares. Más tarde, Hansch introdujo un método original que ya tenía en cuenta algunas características estructurales de las moléculas y que ha sido la base de la mayoría de los estudios de diseño de fármacos hasta finales de los setenta.

A partir de la década de los ochenta, ganó terreno el interés de la morfología molecular, lo que, unido a la aparición de ordenadores cada vez más potentes, condujo al desarrollo de procedimientos de diseño más complejos y fiables. Y así hasta nuestros días, en que podemos distinguir claramente tres corrientes en el campo del diseño molecular, definidas por los métodos empleados: métodos tradicionales, métodos mecano-cuánticos y métodos basados en la mecánica molecular.

Lo métodos tradicionales se basan en la obtención de nuevos descriptores fisicoquímicos, correlacionados después con las propiedades farmacológicas, mediante potentes programas estadísticos. Los métodos mecano-cuánticos, bastante más complejos que los precedentes, obtienen las posiciones y las energías de los átomos y electrones dentro de las moléculas, extrayendo así las formas moleculares o conformaciones de menor energía que serán las más estables y nos ilustrarán sobre la estructura tridimensional más adecuada para la acción farmacológica buscada. Por último, los métodos basados en la mecánica molecular utilizan programas "modeladores-constructores" que permiten al usuario, basándose en cálculos de mecánica clásica, obtener un esquema tridimensional de la molécula que podrá luego refinarse hasta conseguir la conformación deseada.

Tal era el estado de la cuestión cuando nuestro equipo de la "Unidad de investigación de diseño de fármacos y conectividad molecular" inició, a comienzos de los ochenta, una nueva vía de diseño de fármacos asistido por ordenador, basado en la topología molecular. La topología es aquella parte del álgebra que estudia las posiciones de los elementos de un conjunto. Aplicada a las moléculas, estudia cuáles son las posiciones de los átomos en el interior de las mismas. Desde esta perspectiva, importa poco la estructura tridimensional de las moléculas, la naturaleza o los enlaces entre sus átomos y ni siquiera la propia naturaleza de los átomos enlazados. La cuestión fundamental reside en qué átomo está ligado a cuál otro y en cuál sea el camino para ir de un átomo a otro dentro de la molécula.

El método topológico se vale de los "índices" para caracterizar estructuralmente a un compuesto. (Los índices, números que se obtienen por un algoritmo determinado, deben ser lo más específicos posible para cada molécula.) Los átomos de la molécula se representan por puntos y los

enlaces por segmentos, eliminándose los átomos de hidrógeno. De esta forma se obtiene el "grafo" de la molécula. Los grafos se limitan a informarnos de las conexiones entre los átomos de la molécula, pero no de las establecidas entre los ángulos que forman entre sí, longitudes de enlace, orientaciones y demás. Se trata, no obstante, de una información muy valiosa.

Una vez definido un índice (o varios) se establecen correlaciones entre ellos y diferentes propiedades moleculares, para grupos de compuestos más o menos homogéneos; así se pueden enunciar ecuaciones que relacionen tales propiedades con la estructura molecular, caracterizada a través de los índices. (Estas ecuaciones se conocen por funciones de conectividad.) Si calculamos entonces el valor de los índices de nuevas moléculas, es decir, de moléculas no utilizadas en la correlación y se sustituyen en la ecuación, podremos predecir el valor teórico de la propiedad correlacionada para ese nuevo compuesto.

El primer índice topológico capaz de caracterizar la "ramificación" de un grafo lo propuso Wiener en 1947. Se basa en el concepto topológico de distancia, entendida como el número de enlaces entre dos átomos de la molécula por el camino más corto. Aunque en un principio el índice de Wiener mostró muy buenas correlaciones con propiedades sencillas (por ejemplo, la temperatura de ebullición), sólo recientemente se ha demostrado su extraordinaria versatilidad, que permite establecer excelentes correlaciones con las energías de enlace de los electrones de ciertas moléculas complejas (así, en los hidrocarburos policíclicos aromáticos). Ello posibilita la predicción de propiedades tan importantes como la capacidad para conducir la corriente eléctrica o para absorber la luz, entre otras, en el caso de sustancias no sintetizadas todavía en el laboratorio.

Aunque se han definido diversos tipos de índices, los que parecen haber demostrado una mayor eficacia son los llamados "índices de conectividad", generalización del índice de Randic. Introducido en 1975, el índice de Randic se basa en el "grado topológico", que es el número de átomos (o "vértices" en expresión topológica) a los que se enlaza cada uno; representa una medida de la ramificación. Es la la suma de las inversas de las raíces cuadradas de las valencias de cada vértice, entendiendo por éstas el número de enlaces (o aristas) que convergen en él.

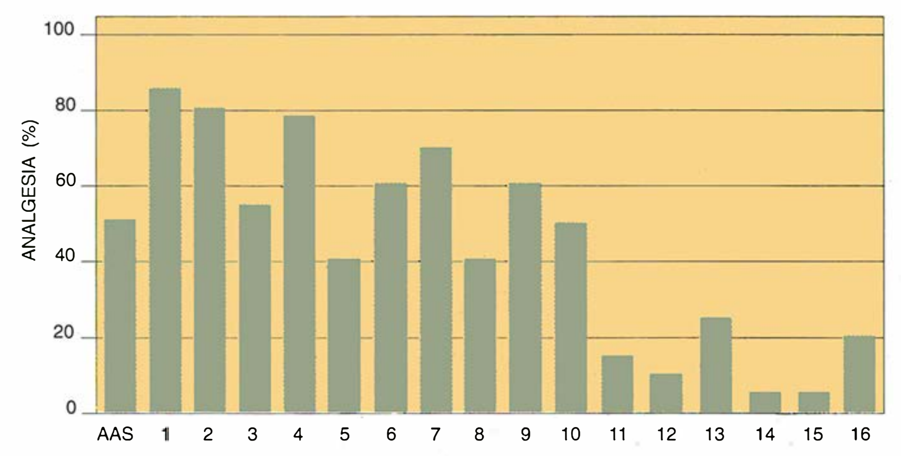
Los índices topológicos han encontrado aplicaciones diversas, desde la predicción del sabor amargo o dulce de una sustancia hasta el estudio de estabilidad de cristales o la predicción de la toxicidad de contaminantes en aire, agua o suelo. Nuestro equipo de investigación los ha aplicado al diseño de nuevos medicamentos, para lo cual ha desarrollado un procedimiento original; consiste en utilizar las funciones de conectividad de forma inversa a la convencional: no se aplica a la predicción del valor que va a obtener una molécula en determinada propiedad, sino a la obtención de la molécula o moléculas que posean un valor prefijado de la propiedad.

El desarrollo del método se realiza en varias etapas. En la primera abordamos la selección del grupo terapéutico a estudiar. A través del rastreo bibliográfico o experimental se identifican los parámetros fisicoquímicos y farmacológicos más significativos (dosificación, toxicidad, potencia, lipofilia, etc.). El paso siguiente se centra en la obtención de las funciones de conectividad; con la ayuda de programas informáticos adecuados se calculan diversos índices topológicos (algunos de ellos de invención propia) y se correlacionan posteriormente con las propiedades seleccionadas del grupo farmacológico objeto de estudio. La tercera etapa consiste en la selección de las funciones de conectividad que evidencien mejor la actividad farmacológica buscada.

Por último, el diseño molecular. Esta etapa implica la ejecución de un paquete informático original, que contiene programas encaminados a construir estructuras químicas, calcular sus correspondientes índices topológicos y seleccionarlas o no en función de los valores prefijados como limitantes de la actividad farmacológica deseada. El paquete se estructura en varios niveles; así, en la primera aproximación selecciona las posibles estructuras fundamentales que pudiesen presentar la acción buscada; luego, por aproximaciones sucesivas, se barren las estructuras derivadas que, en condiciones más restrictivas, puedan suponer unas mejores propiedades farmacológicas.

Los resultados obtenidos pueden considerarse excelentes, al menos en los grupos farmacológicos hasta ahora abordados, que han sido los analgésicos no narcóticos, antibacterianos, hipoglucemiantes y antivíricos. Casi el 50 % de los compuestos diseñados por el ordenador, y sintetizados más tarde, mostraron la acción farmacológica prevista y en algunos casos una toxicidad aguda menor que otros fármacos comerciales.

En la actualidad, nuestro equipo de investigación orienta sus esfuerzos en una doble vertiente. Por una parte, prosigue en la búsqueda de nuevos compuestos con acción farmacológica en distintos campos (hipolipemiantes, antifúngicos, etc.); por otra, se propone introducir nuevos índices topológicos capaces de describir las distribuciones de carga eléctrica dentro de las moléculas. En cualquier caso, los resultados ya obtenidos representan un aval de asombrosa capacidad de la topología molecular para el diseño de nuevas moléculas. (Ramón García Domenech y Jorge Gálvez Alvarez, de la Universidad de Valencia.)



Histograma del porcentaje de analgesia para ciertos compuestos en comparación con el ácido acetilsalicílico (AAS). Varios mostraron una mayor acción analgésica que el AAS. En particular, los reseñados con los números 1 y 2 (el 2-propenil-fenol y la 2,4-dimetilacetofenona) han sido ya patentados (Patentes N+ 9101034 y P9101134) y pueden considerarse nuevos "cabezas de serie" en este campo terapéutico. Entre los compuestos seleccionados que mostraron marcada acción antibacteriana y antivírica se encuentran el 3 etil, 2,5 dihidrotiofeno 1,1 dioxo y el ácido 1,2,3 triazol 4,5 dicarboxílico, respectivamente.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

Regularidad en la Casa del Caos

Juan Tractor trajo a casa un pino fractal perfecto para su árbol de Navidad. Cada rama era reproducción perfecta a menor escala del pino entero. Un objeto fractal perfecto y fragante, en verdad. En el interior de la pequeña residencia de los Tractor reinaba el caos, como siempre.

Juana, su esposa, se había rebozado completamente de pan rallado al querer aplicar la receta de su madre para el pavo relleno recursivo: pavo relleno de salchichas, rellenas de pavitos diminutos rellenos de salchichas menores todavía, rellenas de... Su hija correteaba por la cocina con un gran cazamariposas al grito de "¡Tenemos que impedir el huracán!"

Juan, capaz de tolerar el caos pero no el pandemónium, riñó a su hija.

"¡Lorenza, basta ya! ¿Por qué no te estás quieta, como tu hermano?"

"¡Pero, papá! ¡Estoy tratando de impedir el efecto mariposa-huracán!", dijo Lorenza, jadeante.

"¿Cómo has dicho?"

"Todo el mundo lo sabe. A lo mejor, una mariposa bate las alas en Japón y un mes más tarde se desencadena un huracán en Brasil."

Juan enmohinó los labios. "Puede ser. Pero no estamos en Japón. Ni en Brasil."

Lorenza le miró con severidad. "Papá, no podemos saber dónde se producirá el huracán, ni qué mariposa provocará el desastre, así que me parece que haré bien tratando de cazar alguna."

"¿Por qué no empezáis diseñando los adornos?", cortó Juana. "Os acabamos de comprar un nuevo paquete de gráficos para el ordenador y una impresora en color."

"¡Chuli!", gritó Pointer. "Vamos a hacer adornos caóticos para la Navidad."

"No es mala idea, no", convino su madre. "Pero lo que necesito de verdad son cosas que tengan algo de regularidad, un motivo o algo por estilo... Me hacen falta objetos que colgar del techo, que hagan las veces de luceros y estrellas, aunque me parece que tendríais que ser un poco más originales. Y no me vendría mal un papel de envolver que se saliera de lo común. Pero no quiero nada puramente caótico; me conviene que también tenga regularidad, un patrón que se vea."

Protestando por lo bajo, Lorenza y Pointer subieron remolones hasta el ático, aposento del ordenador. "Caos y orden en el mismo diseño", rezongó Lorenza. "Qué disparate. Lo que mamá quiere es que nos quitemos de enmedio y que no armemos follón."

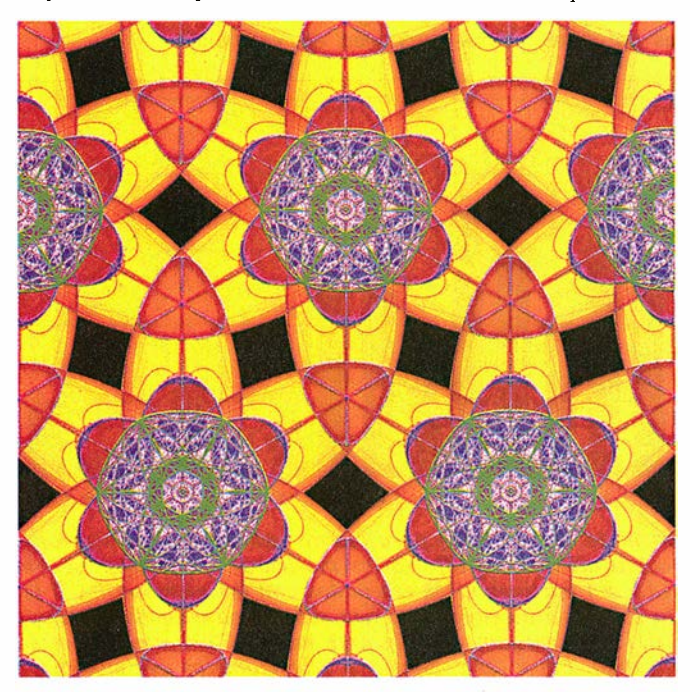
"Es lo que hacemos siempre", admitió Pointer.

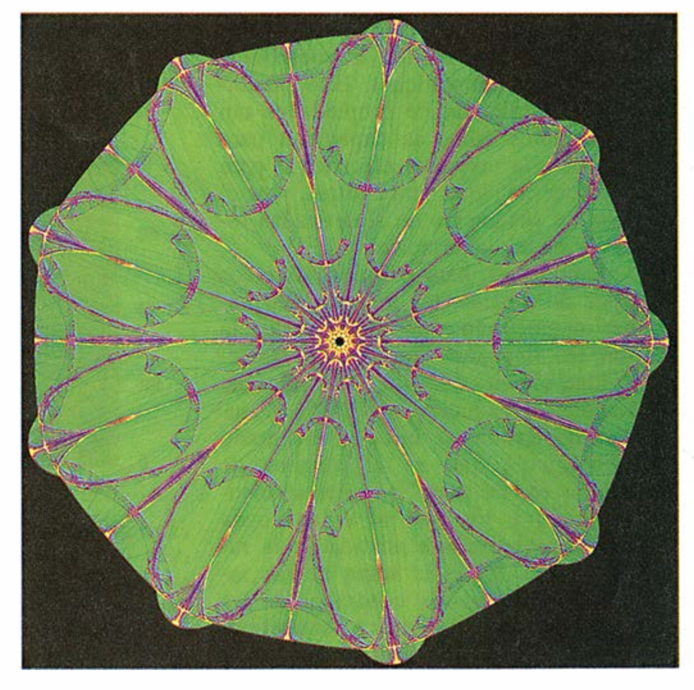
"Sí, es verdad. Pues mira, no pienso darme por vencida. Si lo que mamá quiere es caos y orden al mismo tiempo, por mi parte no ha de faltarle. Regularidades caóticas... ¿se te ocurren cosas que tengan motivos regulares?"

"Los empapelados", señaló Pointer. "Normalmente tienen hileras e hileras de rosas y flores y cosas parecidas. También podríamos estampar un dibujo fractal en cada casilla de un cuadriculado. Así combinaríamos orden y caos."

"No sé... Me parece que sería un poco hacer trampa."

"Bueno, también tenemos los caleidoscopios. Con los caleidoscopios cualquier cosa vale para crear moti-





La combinación de simetría y caos

vos regulares. ¿Te acuerdas de cuando pusimos aquellas piedrecitas de colores en el caleidoscopio?"

"¡Qué idea más brillante! En lugar de piedrecitas pondremos en el caleidoscopio pedacitos de caos. ¿Dónde has dejado las tarjetas fractales? Las iré rastreando por el ordenador mientras tú programas los espejos."

Media hora después, Pointer abandonaba a un lado las postales. "No, no quedan bien. Les pasa lo mismo que a los motivos del empapelado; no son más que un montón de copias de un pedacito de caos."

"Así es. Las líneas donde han sido adosados los espejos del caleidoscopio se notan demasiado. Necesitamos un proceso que no produzca divisorias ya de partida. ¡Claro, ya está! ¡Caos simétrico!"

"Me parece que no me he tropezado nunca con nada por el estilo."

"Hace muy poco que ha sido inventado por Michael Field en Australia y por Martin Golubitsky en Texas. ¿Que cómo funciona? Ya, vale. Empecemos por el caos ordinario. La forma normal de generarlo consiste en iterar una transformación del plano en sí mismo e ir siguiéndole la pista a los puntos."

"Entiendo que quieres decir que se elige una regla fija, una fórmula que convierte pares de números en pares de números. Se toman un par de coordenadas iniciales y se les aplica la regla; depués, se vuelve a aplicar la regla sobre las coordenadas resultantes, y así una y otra vez."

"Exactamente, Pointer. Al considerar los pares de números como coordenadas de un punto del plano, los sucesivos pares pueden quedar dibujados como puntos de la pantalla del ordenador. Los primeros centenares de puntos son 'transitorios', es decir, son producidos antes de que el sistema se estabilice en su comportamiento a largo plazo. Esos no los dibujaremos. Los puntos restantes van componiendo una figura o perfil: el atractor, así llamado porque, se empiece donde se quiera, los puntos son atraídos hacia esa región y la figura que al final se obtiene es la misma."

"En algunos casos el atractor resultará muy poco interesante; por ejemplo, un solo punto. Pero en otros podríamos conseguir figuras maravillosas formadas por volutas y filigranas de muchísimo detalle. O sea, ¡caos!"

"Estás en lo cierto", dijo Lorenza. "El caos simétrico es exactamente lo mismo, aunque con una triquiñuela extra: que se toma una transformación simétrica."

"No controlo. Sé lo que es la simetría al hablar de objetos, pero si se trata de transformaciones..."

"Bueno, pues empecemos por la noción de simetría. Un objeto tiene una simetría cuando hay una forma de moverlo de modo que al final parezca estar exactamente en la misma posición que al principio. Podemos, por ejemplo, girar un cuadrado según ángulos de 0, 90, 180 o 270 grados, y si el observador estuviera de espaldas mientras lo hacemos no podría apreciar cambio alguno."

"¿Y si lo giro 360 grados?"

"Tendría el mismo efecto que no efectuar giro alguno. Cada punto del cuadrado acaba su viaje exactamente en el mismo lugar de donde partió. Ahora bien, los cuadrados tienen otras cuatro simetrías más, correspondientes a la reflexión respecto a rectas 'espejo' que corren horizontal, vertical u oblicuamente según las dos diagonales. Tenemos así un total de ocho simetrías."

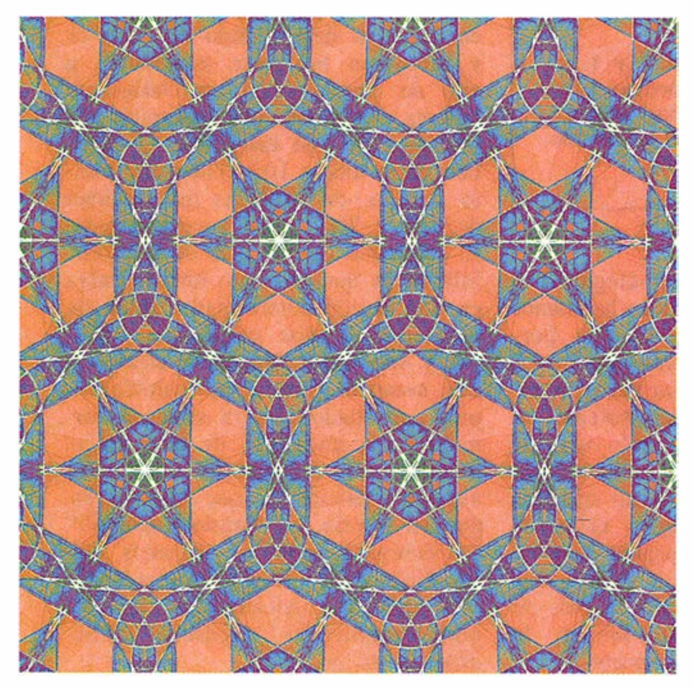
"Captado."

"Supongamos ahora que tenemos una transformación del plano en sí mismo, vale decir, una regla que envía cada punto concreto a otro punto bien determinado. La regla podría consistir, por ejemplo, en que cada abscisa x sea elevada al cubo y también lo sea cada ordenada y. Esta regla, que podría denotarse $(x,y) \rightarrow (x^3,y^3)$, crea una imagen del original."

"Okey."

"Cuando digo que esta aplicación posee una simetría, quiero decir que las imágenes de todo par de puntos simétricamente relacionados guardan entre sí la misma relación de simetría. Imaginemos que la simetría consista en 'girar 90 grados'. Tomo un punto P cualquiera y aplico la transformación; obtengo así un punto P'. Después hago girar P un ángulo de 90 grados, obtengo Q, y por último aplico la transformación a Q, con lo que resulta Q'. Lo que quiero es que Q' sea el resultado de someter P' a un giro de 90 grados. Cuando así sucede para todos y cada uno de los puntos P, se dice que la transformación posee simetría rotacional de 90 grados."

"¡No corras, que me caigo de la moto! ¿No podrías darme un ejemplo?"





produce exquisitos motivos decorativos.

Fórmulas del caos simétrico

Los lectores pueden preparar por sí mismos programas que generen imágenes del caos simétrico. El programa comienza con un cierto punto arbitrario (x,y), denotativo de una determinada posición en la pantalla del ordenador. Después, para crear una imagen con triple simetría, el programa debería llevar a la práctica la siguiente transformación:

$$x \rightarrow ax + bx(x^2 + y^2) + c(x^3 - 3xy^2) + d(x^2 - y^2)$$
$$y \rightarrow ay + by(x^2 + y^2) + c(3x^2y - y^3) - 2dxy$$

Estas instrucciones significan, sencillamente, que el programa ha de introducir los valores iniciales de x e y en las fórmulas situadas a la derecha de las flechas para calcular un segundo punto; enseguida, ha de sustituir las x e y que figuran en dichas fórmulas por los valores recién calculados, con lo que se obtendrán las coordenadas de un tercer punto, y así sucesivamente. El programador puede elegir a capricho los valores de a, b, c y d, pero ha de tener presente que muchas elecciones producen figuras compuestas por puntos aislados o caen fuera de la pantalla. Pruébese con $a = 1{,}89$, $b = -1{,}10$, $c = 0{,}17$, $d = -0{,}79$, por ejemplo.

Al cabo de unas 100 iteraciones, el programa debería empezar a contabilizar cuántas veces caen los puntos en una determinada porción de la pantalla, asignándosele un color a cada región en función del número de veces que es visitada. Gradualmente debería ir apareciendo en la pantalla una imagen caótica dotada de simetría triple. ¡Experimente y tenga paciencia!

Transformación con simetría cuádruple:

$$x \rightarrow ax + bx(x^2 + y^2) + c(x^4 - 6x^2y^2 + y^4) + d(x^3 - 3xy^2)$$
$$y \rightarrow ay + by(x^2 + y^2) + c(4x^3y - 4xy^3) + d(-3x^2y + y^3)$$

Transformación con simetría quíntuple:

$$x \rightarrow ax + bx(x^2 + y^2) + c(x^5 - 10x^3y^2 + 5xy^4) + d(x^4 - 6x^2y^2 + y^4)$$
$$y \rightarrow ay + by(x^2 + y^2) + c(5x^4y - 10x^2y^3 + y^5) + d(-4x^3y + 4xy^3)$$

Colchas:

$$x \rightarrow a\ \mathrm{sen}(2\pi x) + b\ \mathrm{sen}(2\pi x)\cos(2\pi y) + c\ \mathrm{sen}(4\pi x) + d\ \mathrm{sen}(6\pi x)\cos(4\pi y) + kx$$
$$y \rightarrow a\ \mathrm{sen}(2\pi y) + b\ \mathrm{sen}(2\pi y)\cos(2\pi x) + c\ \mathrm{sen}(4\pi y) + d\ \mathrm{sen}(6\pi y)\cos(4\pi x) + ky$$

En este caso x e y tienen que estar comprendidas entre 0 y 1; el programador puede elegir los coeficientes a, b, c y d a su albedrío, pero k tiene que ser un número entero. Casi todas las elecciones generan figuras gratas de ver, mas para apreciar plenamente el efecto es preciso que el programa imprima varias copias adosadas de la figura.

Loren frunció los labios, pensativa. "Pues sí. Echémosle un vistazo a la transformación 'cúbica' $(x,y) \rightarrow (x^3,y^3)$, y veamos si tiene la simetría de rotación anterior. Sea P el punto (x,y). Entonces P' es (x^3,y^3). El giro de 90 grados en torno al origen también es una simetría, que envía (x,y) al punto $(y,-x)$, que es Q. Después, la "cúbica" envía Q a Q', que es $(y^3,(-x)^3)$.

"Nos queda por averiguar si Q' resulta de hacer girar 90 grados al punto P'. Pero al girar 90 grados el punto P' se obtiene $(y^3,-x^3)$, que es el mismo que Q', porque $(-x)^3 = -x^3$."

"Ya. Me parece que lo he entendido. Si la transformación elegida hubiera sido $(x,y) \rightarrow (x^2,y^2)$ no habríamos tenido esta simetría de rotación, porque $(-x)^2$ no es lo mismo que $-x^2$."

"Muy bien. Es preciso verificar todas las simetrías correspondientes al caso, claro está, y no sólo una de ellas. Si la transformación ha de poseer simetría respecto a un eje, los puntos que sean imagen reflejada uno del otro en tal espejo han de quedar transformados en puntos que sean también imagen uno de otro en ese mismo espejo. Por ejemplo, la simetría de reflexión respecto al eje de ordenadas y envía (x,y) a $(-x,y)$. Comprobarás enseguida que la transformación 'cúbica' posee también simetría de ese tipo."

"Me imagino que en el caso de simetría triple o quíntuple, como los triángulos equiláteros o las estrellas pentagonales, valdrá lo mismo para giros de 120 o de 72 grados."

"Exactamente", respondió Lorenza. "Aunque las fórmulas correspondientes a estos giros se complican un poco, por no corresponder a ángulos rectos. Supongamos ahora que una transformación simétrica sea iterada, eligiendo un cierto punto inicial y aplicándolo una y otra vez al resultado anterior. Y supongamos que el atractor resultante sea caótico, como suele suceder. Se obtiene entonces un desorden tan hermoso como abundante. Pero también habremos de apreciar forzosamente algún efecto de la simetría, y a decir verdad, el atractor resulta simétrico montones de veces. Si la transformación posee simetría quíntuple, pongamos por caso, se obtienen atractores semejantes a estrellas de cinco puntas, dotadas de muchísima y caótica filigrana simétricamente dispuesta."

"Has dicho que 'el atractor es simétrico montones de veces'. ¿Por qué no lo es siempre?"

"Lo que pasa es que a veces se obtienen varios atractores distintos, aunque simétricamente relacionados. Por ejemplo, cinco atractores con simetría respecto a un eje dispuestos en formación pentagonal. De haber un único atractor, como suele ser el caso, ha de ser simétrico.

"Field y Golubitsky hicieron una cosa más. Contaron el número de veces que el punto en iteración cae en un lugar determinado del atractor y dibujaron la figura atendiendo a ello de acuerdo con un código de colores. Digamos, por ejemplo, que pintamos de rojo las zonas que reciben entre una y 100 visitas del punto iterado, de azul las que reciben de 101 a 200, y así sucesivamente. El coloreado da una idea de la probabilidad de que el punto iterado caiga en una región determinada, amén de obtenerse diseños coloreados caóticos y simétricos, llenos de atractivo. Son como el caos de un caleidoscopio, pero dado que la simetría formaba parte integrante de la transformación, no se aprecian bordes de aspecto artificial. Lo que tenemos es, por así decirlo, un 'caosleidoscopio'."

"Vamos a probarlo. ¿Cuáles son las fórmulas de la transformación?"

"Tendré que consultarlas. Son un poco complicadas." [*Véase el recuadro que se adjunta*].

Transcurrieron varias horas mientras Lorenza y Pointer se dedicaban

a producir motivos caóticos policromados. A diferencia de los motivos creados por el caleidoscopio, los suyos no resultaban de copiar muchas veces una misma imagen girada según diferentes ángulos o reflejada en diversas rectas. Las figuras se iban formando gradualmente; iban emergiendo del fondo oscuro como van asomando los árboles entre la niebla. Los puntos nuevos parecían ir añadiéndose al azar y, sin embargo, la transformación parecía "saber" de alguna forma que su atractor tenía que ser simétrico.

Tan tranquilos estuvieron Lorenza y Pointer mientras trabajaban que al final sus padres subieron a ver qué maldad podrían estar preparando. Los niños exhibieron ufanos sus diseños.

"Pero... ¡si son maravillosos!", declaró Juana. "¿No me podríais hacer también un poco de papel de envolver para los regalos?"

"¡Claro que sí!", exclamó Lorenza. "Field y Golubitsky los llamaron colchas ('quilts'). Consisten en atractores caóticos con los mismos tipos de simetría que el empapelado, o sea, simetría reticular, en la que puedes desplazar la figura hacia un lado y hacerla encajar sobre sí misma. También pueden tener simetrías por giro o reflexión, si se quiere. Se consiguen exactamente de igual manera, aunque ahora es preciso utilizar transformaciones que posean la misma clase de simetría que el empapelado. Y para apreciar plenamente el efecto es preciso dibujar varias copias de las figuras, adosadas por lados como los azulejos de la pared."

"Estoy sorprendido", dijo Juan. "Jamás se me hubiera ocurrido que orden y caos pudieran mezclarse en el mismo objeto. Y desde luego, no me parecía que el resultado pudiera ser tan hermoso. ¿Por qué no aprovecháis ahora para decorar el árbol?"

Los niños saltaron de alegría, ilusionados. Destaparon una caja llena de adornos de papel y salieron a la carrera, escaleras abajo. Cuando sus padres les alcanzaron, la mitad del árbol de Navidad estaba adornado ya, y la sala, sembrada de trozos de papel. Juan le musitó a su esposa: "La verdad es que siempre supe que el orden y el caos podrían ser hermosos."

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

FEARFUL SYMMETRY: IS GOD A GEOMETER? Ian Stewart y Martin Golubitsky. Blackwell Publishers, 1992.

SYMMETRY IN CHAOS. Michael Field y Martin Golubitsky. Oxford University Press, 1992.

Libros

Nicolás García Tapia, José María Sancho, Jordi Agustí y Luis Alonso

Arquitectura de los Austrias

Puentes castellanos

LA ARQUITECTURA DE PUENTES EN CASTILLA Y LEON (1575-1650), por Miguel A. Aramburu-Zabala Higuera. Junta de Castilla y León; Valladolid, 1992.

No es frecuente encontrar un libro sobre puentes escrito por un historiador y menos de la especialidad de arte. Hasta ahora han sido los ingenieros de caminos los que mayoritariamente se han acercado al estudio de los puentes, con un enfoque estructural, pero, salvo contadas excepciones, pocas veces se ha logrado un trabajo histórico convenientemente documentado. Así, hay puentes considerados como de época romana que se iniciaron en el siglo XII y a veces hasta en el siglo XVIII. Lo mismo puede decirse desde el punto de vista artístico: se confunden los estilos y se habla, por ejemplo, de influencia palladiana en ciertos tipos de puentes (o incluso de plagio de Palladio) a lo que responde a una tradición clásica romana reelaborada por Alberti.

Miguel Angel Aramburu, historiador del arte, ha utilizado en esta obra una metodología histórica rigurosa, estudiando los puentes castellanos entre 1575 y 1650, a partir de la amplia documentación existente en el Archivo de Simancas y en otras fuentes nacionales y locales. Consigue así datar la mayoría de los puentes de la zona, dando a conocer los nombres de los arquitectos y maestros que los diseñaron y los construyeron, que son los mismos que hicieron las catedrales, las parroquias, los conventos y los palacios castellano-leoneses. Se obtienen datos muy importantes sobre arquitectos cuya obra quedaba incompleta sin el conocimiento de los puentes que habían construido. Se sacan también interesantes conclusiones que ligan el puente a las corrientes estilísticas de la arquitectura del momento. Para los ingenieros-arquitectos de los siglos XVI y XVII, el puente era una obra más, a veces con mayores problemas que otros edificios.

El libro, basado en una tesis doctoral de mayor extensión, está dividido en dos partes: una primera de estudio general de los puentes y una segunda que constituye un detallado catálogo de los puentes realizados entre 1575 y 1650 en lo que conforma la actual comunidad de Castilla y León. Podrían quizá haberse escogido otros criterios a la hora de estudiar y catalogar los puentes, pero la elección del autor permite una visión de los aspectos artísticos e históricos del puente investigado, que, salvo algunos puntos menores más o menos discutibles, resulta de un gran interés, no sólo para los especialistas sino para todos los que sientan curiosidad por las obras del pasado. (N. G. T.)

Física atómica

Manual europeo

THEORETICAL ATOMIC PHYSICS, por Harald Friedrich. Springer Verlag; Berlín, 1991.

Es muy difícil predecir la dirección del progreso científico, incluso a medio plazo. Nadie podía imaginar, escasos años atrás, que los láseres revolucionarían la bien consolidada, aunque algo alertagada quizá, física atómica y situarían a la óptica en la vanguardia de las ciencias físicas.

Conocíamos los logros de la física atómica en el estudio de las propiedades de los elementos de la tabla periódica, lo mismo en estado libre que bajo la acción de campos electromagnéticos. La disciplina había alcanzado el estatuto de teoría clásica, lo que había frenado su ritmo de desarrollo. Pero de unos años a esta parte estamos asistiendo al auge de los denominados agregados atómicos, que constan de un número grande, si bien finito, de átomos. Recordemos, por ejemplo, los fullerenos; en particular, el formado por 60 átomos de carbono. Todos ellos presentan unas propiedades muy interesantes y los más importantes abren la puerta a nuevos materiales.

Aunque no encierre ninguna novedad que la luz puede empujar a los átomos, costaba imaginar que la conjunción de campos ópticos con la dinámica interna del átomo hiciera posible congelar éste a temperaturas de milikelvin, suspender el átomo en el espacio, voltearlo como un bola de tenis o provocar unas colisiones muy lentas entre átomos. Un conjunto de átomos fríos ya ha producido señales resonantes 50 veces más intensas que las obtenidas hasta la fecha en los mejores relojes atómicos. Relacionado con este hecho ha empezado a desarrollarse una nueva disciplina, la óptica atómica, centrada en la interacción entre átomos y campos ópticos. Espejos hechos con luz son capaces de reflejar un flujo de átomos, y se ha creado un nuevo arte de interferometría utilizando haces coherentes de átomos.

El volumen que motiva estos comentarios puede considerarse un libro de texto avanzado para la asignatura de física atómica, y así viene avalado por este uso en la Universidad de Munich. Dado que los alumnos interesados en esta disciplina, fundamentalmente físicos y químicos, han de pasar necesariamente por al menos dos asignaturas "cuánticas", podrán abordar este libro con los conocimientos necesarios para captar sus contenidos. El libro empieza con dos capítulos metodológicos. En el primero nos presenta un resumen de mecánica cuántica condensado de tal forma que sólo puede ser de utilidad para un lector ya preparado. Aunque el autor sostiene que no se necesitan conocimientos previos de mecánica cuántica, basta leer este capítulo para desmentirlo.

En el segundo capítulo presenta las herramientas de trabajo para el estudio de átomos e iones, dedicando, como debe ser, mucha más extensión a las técnicas específicas para los sistemas multielectrónicos, emisión y absorción de radiación y teoría de perturbaciones. El resto, un tercer, cuarto y quinto capítulos más, está dedicado a las aplicaciones: el tercero se centra en el estudio de los espectros atómicos, principalmente en

presencia de campos externos; el cuarto aborda las colisiones atómicas, desde una buena puesta al día de la dispersión elástica hasta la inelástica, concluyendo en los canales de salida con dos electrones libres; en el quinto presenta el estudio de la absorción multifotónica y aspectos que relacionan la mecánica clásica con la mecánica cuántica.

Pueden ser capítulos de gran utilidad para quien esté interesado en temas relacionados con óptica cuántica, disciplina que está sufriendo una gran transformación. Destaquemos también la atención prestada al caos cuántico. Se agrega, por último, un apéndice elemental sobre funciones especiales, que suelen abordarse con mayor pormenor en otros manuales. (J. M. S.)

Antropología

Anatomía evolutiva

An introduction to human evolutionary anatomy, por L. Aiello y C. Dean. Academic Press; Londres, 1990.

Tratar la anatomía humana desde el punto de vista evolutivo supone una labor de selección previa de aquellos caracteres que tienen mayor significación en el curso de los últimos doce millones de años. Implica también realizar una evaluación o pesaje de las polaridades de cada carácter. Y todo ello, a su vez, sin dejar de comprometerse en el análisis anatómico de detalle, tal como hace cualquier libro de texto sobre anatomía. Una tarea nada fácil.

El libro se estructura en torno a veintitrés capítulos, de los cuales el primero realiza una concisa introducción a la clasificación, a la reconstrucción filogenética y al registro fósil. Aunque corto, un capítulo de este tipo era necesario, especialmente por lo que respecta a la sistemática cladista (piénsese, por ejemplo, que la reciente reestructuración de las familias Pongidae y Hominidae descansa sobre todo en la introducción de criterios cladísticos en la sistemática, antes que sobre cualquier descubrimiento moderno, sea bioquímico o paleontológico). Los siguientes dos capítulos ("Nomenclatura anatómica" y "Microanatomía del músculo y del hueso") se refieren a aspectos generales que difieren poco de los correspondientes a cualquier manual de anatomía. El resto puede desglosarse en dos tipos básicos que se reparten por toda la obra. Un primer grupo, entre los que se encuadran los capítulos correspondientes a "Huesos del cráneo", "Sistema masticatorio", "Región intracraneal" y "Espina dorsal", corresponden a textos "duros", básicamente anatómicos, dedicados a la descripción pormenorizada de cada una de las partes estudiadas.

Los aspectos evolutivos o funcionales correspondientes a varios de estos capítulos se desarrollan en otros aparte que aparecen desligados de los anteriores. Es el caso del capítulo 15, sobre "Caja torácica y columna vertebral en homínidos" (que complementa al capítulo 12) o el capítulo 11, sobre anatomía facial (que debería seguir a los capítulos 4 y 5). Este último ayuda a comprender la evolución de los hominoideos (especialmente la posición de los sivapitécidos con respecto a póngidos y homínidos) y tan sólo hay que lamentar que en el caso de los australopitecos no se incluya al cráneo WT-17000 (que sí se incluye, sin embargo, cuando se estudia el cráneo en *norma lateralis*).

Otros capítulos que destacan por la selección de información y por el tratamiento que se hace del tema son los correspondientes a ultraestructura y secuencias de substitución y desgaste de los molares y, en general, aquellos que hacen referencia a la morfología y variabilidad de la dentición. Pero donde los autores muestran claramente sus preferencias y donde la obra se hace más interesante es en los aspectos relativos a la biomecánica de la hominización: "Huesos, músculos y movimientos de los miembros anteriores" (c. 16), "El brazo de los hominoideos" (c. 17), "La mano de los hominoideos (c. 18), "Huesos, músculos y movimiento de los miembros posteriores" (c. 19). "La pelvis de los hominoideos" (c. 20), "El fémur de los hominoideos" (c. 21), "La rodilla de los hominoideos y la parte inferior de la pierna" (c. 22), "El pie de los hominoideos" (c. 23).

En su análisis del registro fósil, Aiello y Dean se detienen en *Australopithecus afarensis*, y ésta es tal vez una de las pocas críticas que deban formularse a la obra. En efecto, en el estado actual de la cuestión, la problemática inherente al origen de los primeros homínidos ha superado ya los 3 o 4 millones de años de la paradigmática "Lucy". Hoy día, el análisis del origen y evolución de los primeros homínidos no puede ya desvincularse del stock hominoideo que se extendía por toda Eurasia y Africa hace unos diez millones de años. Cuestiones tan fundamentales como la separación entre Póngidos (restringida esta familia al orangután y sus parientes fósiles) y Homínidos (incluyendo a gorila y chimpancé) no pueden ser obviadas en un texto sobre evolución humana. En este sentido, las comparaciones con el "grupo externo" a los *Australopithecus* se establecen normalmente con el gorila o el chimpancé, pero muy raramente con el orangután, siendo así que el análisis de los caracteres de este último tiene una relevancia fundamental en el origen de los homínidos. (J. A.)

Revolución científica

Alquimia

Cornelius Agrippa. *De occulta philosophia libri tres*. Edición crítica e introducción de V. Perrone Compagni. E. J. Brill; Leiden, 1992.

Rationalité de l'alchimie au xviie siècle, por Bernard Joly. Vrin; París, 1992.

The alchemical world of the German court. Occult philosophy and chemical medicine in the circle of Moritz of Hessen (1572-1632), por Bruce T. Moran. Franz Steiner Verlag; Stuttgart, 1991.

The Janus faces of genius. The role of alchemy in Newton's thought, por Betty J. T. Dobbs. Cambridge University Press; Cambridge, 1991.

La alquimia tiene un pie en la filosofía (platonismo y hermetismo) y otro en la química médica. Los cuatro libros de la reseña estudian el primer punto de apoyo, sin que puedan prescindir, no obstante, de una continua referencia al otro soporte; en realidad, el pensamiento idealista y cabalístico viene a ser la atmósfera que envuelve una química naciente, envoltura de la que se liberará en cuanto alcance la mayoría de edad.

De occulta philosophia libri tres ("Tres libros sobre la filosofía oculta") lo escribió Cornelius Agrippa en 1510, si bien no apareció impreso hasta 1533, con bastantes modificaciones y añadidos del manuscrito. Agrippa forma estribillo con Ficino, Pico y Reuchlin cuando alguien abre un ensayo sobre los neoplatónicos del Renacimiento. Pero, ¿quién era? Un prototipo del intelectual del pri-



Heredero y estudioso de la tradición alquimista, Newton, genio de la revolución científica, reencarna en los tiempos modernos el mito de Jano.

mer tercio del XVI. Tras graduarse en la Universidad de Colonia en 1502, prosigue su formación en París, viaja por Europa, quizás estuvo en España, desempeña mil trabajos (tutor, abogado, médico), se adscribe a grupos cerrados y dedica interesadamente a los poderosos sus obras, que versan sobre lo divino y lo humano.

¿Qué ideas defendía? En sus años de estudiante se familiarizó con Plinio el Viejo y con Raimundo Lulio, una mezcla de naturalismo enciclopédico y algebrismo lógico. Pronto sus lecturas, y sus viajes, le llevan a los cultivadores de la magia, los que reconocen la unidad armoniosa de los seres, la animación del mundo y la influencia directa del macrocosmos en el mesocosmos (los fenómenos terrestres) y en el microcosmos que es el cuerpo humano. Entienda el lector la "magia" como un saber que se proponía abarcar la física o composición de los objetos naturales, la matemática (con la astronomía incluida) y la teología, amalgamando principios y niveles en una jerga que obscurecía todavía más la así llamada "oculta filosofía".

Uno de los autores que inspiraron a Agrippa, además de los neoplatónicos renacentistas aludidos antes, es Alberto Magno, naturalista del siglo XIII bajo cuyo prestigio se ampararon escritos espúrios que introdujeron conceptos clave de la alquimia anterior a Paracelso, como la noción de similaridad, en virtud de la cual una especie (viva o inerte) poseía una tendencia innata a atraer y modificar la naturaleza de otras, o el principio de simpatía que regulaba la atracción o repulsión de las cosas. Alberto era, sin embargo, un aristotélico que buscaba la explicación científica en el descubrimiento de las causas de los fenómenos, en tanto que Agrippa se adhiere a un magma pitagórico y órfico que dota de poderes especiales, y por supuesto desconocidos, a los cuerpos. Conforme éste se va haciendo más hermético —más amante de la armonía universal y simbología pseudobíblica o cabalística de Francesco Giorgio Veneto— su distanciamiento del naturalista se torna más ácido.

Los tres libros de *De occulta philosophia* cubren, respectivamente, la filosofía natural, la numerología astronómica y la religión. En la filosofía natural no sólo se estudian los cuatros elementos y la composición de las cosas, sino también los poderes escondidos de las mismas (expulsar los venenos, ahuyentar los parásitos o atraer el hierro), la adivinación, los sueños y el significado cabalístico de las palabras. La simbología numérica y la influencia de los astros (zodiaco y estrellas fijas) son el objeto del libro segundo, para entrar, en el tercero, en la supuesta sabiduría, accesible sólo a los escogidos, de los textos de la tradición hermética.

Pero la alquimia tiene, debajo de una densa envoltura simbólica e imaginaria, su propia racionalidad, y el desentrañarla es el objetivo que se ha propuesto, siguiendo una larga tradición francesa, Bernard Joly en *Rationalité de l'alchimie au XVIIe siècle*. Centuria ésta que asiste a un renacimiento de la medicina paracelsista, la instauración de la ciencia moderna y el fervor alquimista que recorre todas las cortes del centro y norte de Europa. Entusiasmo que se ejemplifica en una eclosión bibliográfica de compendios de los tratados sobre el arte de la transmutación desde los griegos hasta entonces, en forma de *Bibliotheca chemica, Theatrum chemicum, Musaeum hermeticum, Lexicon chemicum, Dictionarium hermeticum*, etcétera; siendo su propósito, en buena medida, revelar el contenido oculto a través de la definición, lo que no siempre se consigue. En esa línea explicativa se inscribe el *Manuscriptum ad Fridericum* de Pierre-Jean Fabre, del que Joly aporta aquí su texto y traducción.

Fabre no se limita a servir de intermediario, poner en claro lo oculto a través de la decodificación de los símbolos; va más allá al deshilvanar el hilo lógico de los principios, la teoría y los procesos alquímicos, así como sus fracasos en la búsqueda de la piedra filosofal. P.-J. Fabre (1588-1658) era médico real, formado en Montpellier, seguidor del movimiento paracelsista y partícipe en la disputa del antimonio que enfrentaba a galenistas (el antimonio es veneno) e iatroquímicos (el antimonio es el mejor antídoto por su vigor purgativo).

Ante los cuatro elementos constitutivos de la materia propuestos por Empédocles (fuego, aire, tierra y agua), que Platón desarrolló geométricamente en el *Timeo* (el corpúsculo de fuego es una pirámide, el de tierra un cubo, el de aire un octaedro y el de agua un icosaedro, más el éter, origen de la noción aristotélica de quintaesencia y que respondía al descubrimiento de un nuevo poliedro regular), la química paracelsista proponía un cambio copernicano con sus tres principios fundamentales: mercurio, azufre y sal. Y si

bien los concordistas se esforzaron por lanzar puentes entre una y otra filosofía de la naturaleza a través de las cualidades básicas (el azufre como principio de lo cálido y el mercurio como principio de lo húmedo), la singularidad de lo salino puso muy pronto sobre el tapete la incompatibilidad mutua entre espagíricos (alquimistas) y aristotélicos.

Con ese cuadro de fondo, la investigación alquimista expuesta en *Manuscriptum ad Fridericum* se propone un triple objetivo: conferir, mediante un proceso purificador, la perfección a todo lo imperfecto, lo que, aplicado al reino mineral vale para todos los metales salvo el oro y la plata; obtener el elixir, la quintaesencia, que sirva de remedio universal, y, por último, adquirir el conocimiento de todas las cosas y de la naturaleza entera, ya que todo tiene una solidaridad radical y es lo mismo "lo de arriba y lo de abajo". Propósitos que tienen una manifiesta lectura simbólica y un trasfondo epistemológico que Joly funda en la escuela estoica. Por si el texto de Fabre no fuera suficientemente explícito, el traductor añade un largo comentario donde se explican las nociones fundamentales (piedra filosofal), los principios, los procesos, las alegorías y, de manera detenida, el alkagesto o el disolvente universal, que convierten a la obra en un útil vademécum introductorio a la doctrina alquimista.

Volumen que halla cabal complemento en la biografía general de los fautores de esa corriente, que eso es, entre otras cosas y a pesar de su título restrictivo, el libro de Bruce T. Moran, *The alchemical world of the German court. Occult philosophy and chemical medicine in the circle of Moritz of Hessen* (1572-1632). Restrictivo sólo en presurosa aproximación, porque Kassel, sede de la corte, y Marburgo, el centro universitario, se convirtieron en los años del landgrave en las capitales europeas de las ideas alquímicas, paracelsistas, rosacruces y cabalísticas, de la filosofía hermética en una palabra, constituida en credo oficial.

Moran, que atribuye por entero ese impulso a Moritz, se recrea a lo largo de los dos primeros capítulos en destacar las excelencias del príncipe, no sólo protector e inductor del movimiento alquimista, sino también cultivador de las artes y de las ciencias, teólogo y jurista, con un desgraciado final inmerecido. ¿Habrá querido crear un parangón, sin mencionarlo, con nuestro Alfonso X? Moran gana en credibilidad cuando lima sus juicios, es decir, en las ciento cincuenta páginas restantes.

De los ocho profesores que nombró para Marburgo, tres apuntalaron la nueva dirección: en la facultad de artes (filosofía, física y matemática), Rudolf Goclenius, paracelsista que había bebido la nueva ciencia en Dinamarca; en la de teología, Raphael Eglinus, protestante que unía religión y doctrinas herméticas de los renacentistas italianos; en la de medicina, Johannes Hartmann, auténtico catalizador de la quimiatría académica. Este creó incluso lo que podríamos llamar clases prácticas de laboratorio con sus manuales de consulta (Quercetanus, Libavius, Beguin, Croll y Ruland) y su diario de actividades e incidencias, explicando los procesos de acuerdo con la tríada paracelsista; así, por ejemplo, las propiedades narcóticas y medicinales del opio no procedían de las cualidades y sus grados de que hablaba la tradición galénica, sino del principio sulfúreo que se extraía por acción del fuego.

De ese talante participaba la corte entera, con el landgrave a la cabeza, quien lo mismo mandaba a su médico de cámara Wolf sometiera a prueba las recetas vitriólicas del espagírico italiano Sala para curar a la princesa, que constituía a Mosanus en inspector de todos los proyectos alquímicos en frenética ebullición (tintes, amalgamas, disolventes). Una atmósfera práctica que debe entenderse, sin embargo, inmersa en una cosmología vitalista, alimentada por la influencia de Michael Maier, a través de su correspondencia y, sobre todo, de su libro *Atlanta Fugiens*: el arte de la purificación y transmutación de los metales se desarrollaba merced a un espíritu astral que lo bañaba todo. Moran trae a escena también otras figuras secundarias, otras alquimias, que ayudan a entender la situación intelectual de Europa a las puertas de la guerra de los Treinta Años.

Si nadie duda ya de la continuidad histórica entre alquimia y química, menos asentado parece el engarce de la alquimia con la mecánica, en particular porque aceptarlo supone atribuir a Newton ese nudo. Lo propone con aplastante documentación, una vez más, Dobbs en *The Janus faces of genius. The role of alchemy in Newton's thought.* Lo niegan quienes, con I. B. Cohen, desearían ver al padre del cálculo y de la física moderna exento de cualquier sombra de supuesta irracionalidad. Señaladamente, para Dobbs y Westfall la atracción gravitatoria debe explicarse en el marco de los principios activos de los alquimistas; para Cohen arranca del análisis dinámico de la inercia y la fuerza central, matemáticamente justificado.

La tesis que la autora defiende, simbolizada en las dos caras de Jano, revela un Newton hijo de su tiempo, es decir, heredero e investigador durante cincuenta años de la tradición hermética, y el Newton que alumbra la nueva era de la ciencia. Dobbs culpa a nuestra concepción contemporánea del método científico, basado en modelos hipotético-deductivos de soporte matemático y comprobación experimental, de la visión unidimensional de los *Principia* y otras obras. Cierto es que Newton fue cabal matemático cuando escribía sobre el cálculo y físico riguroso cuando exponía las leyes de la mecánica; pero no lo es menos que se mostraba consumado alquimista en el manejo del mortero, el alambique o el horno y en los múltiples escritos sobre el tema. Intereses dispares que él unificaba en su búsqueda de la verdad total, entendida como la expresada por Dios en el texto sagrado y en el libro de la naturaleza.

Se manifestaba ésta, la naturaleza, en múltiples formas, que la teoría corpuscularista dominante explicaba a través de la cohesión dispar de partículas últimas en un movimiento permitido por los intersticios vacíos. Newton aceptaba la interpretación mecanicista para la materia inerte, pero las plantas, y hasta cierto punto los metales, exigían procesos de fermentación, putrefacción, asimilación, digestión y crecimiento que demandaban la existencia de una fuerza oculta, una suerte de fluido vital (*pneuma* en los estoicos) que escapaba a las leyes de la mecánica. En sus palabras, se trataba de un "espíritu sutil", "un agente universal de la naturaleza", "un espíritu vegetal o fuego secreto", capaz de articular lo disperso.

Dobbs da un vuelco en la interpretación actual de Newton y convierte el "espíritu vegetal" en el eje de los *Principia*; ese agente universal es ahora la potencia divina, una de cuyas manifestaciones será la gravitación universal, matemáticamente mensurable. Subsume así la mecánica newtoniana en un tratado teológico. Consciente de la radicalidad de esa tesis, se apega a la descripción cronológica de la evolución del pensamiento del máximo exponente de la revolución científica. Para que el lector sopese por sí mismo la validez de su razonamiento expone en cinco apéndices los manuscritos más significativos. (L. A.)

Apuntes

La comparación del brillo solar con el comportamiento de 33 estrellas solares, en un registro observacional que ha durado ocho años, abona la idea de que el astro se halla en una fase de insólita quietud. Ese dato revela cuán arriesgadas pueden ser las reconstrucciones de la luminosidad del Sol en el pasado deducida de las informaciones sobre las manchas.

La historia de la emancipación de la mujer suele estar contada con anécdotas misóginas. Joan Freeman, símbolo del éxito femenino en el duro campo de la física, recuerda la perla siguiente: "Había un físico de Cambridge, de nombre G. F. Searle, quien daba las clases prácticas de los primeros cursos de carrera durante la famosa era de Rutherford. Agradecí no tener que empezar mis estudios con él, en particular por sus prejuicios contra las chicas. Se dice que en cierta ocasión se dirigió a la agraviada de turno para espetarle: ¿Lleva Vd. corsé? No puede trabajar en un laboratorio de física, con los imanes y otros aparatos magnéticos, si lleva corsé de varillas y presillas de acero. Haga el favor de quitárselo."

Se había comprobado, en eucariotas inferiores (tripanosomátidos, *Euglena* y vermes), la unión de ciertas secuencias exónicas de moléculas de ARN distintas a través de un proceso de corte y empalme *trans*. Se ha dado un paso más, que confirma el carácter conservador de ese mecanismo en la naturaleza, al ratificarlo en células de mamífero.

¿A qué obedece la fuerza de los monzones del subcontinente indio? Si las simulaciones del modelo de W. L. Prell y J. E. Kutzbach son correctas, las causas serían una intensa radiación solar y la altura de sus montañas. Avanzan que el rápido levantamiento del Himalaya produjo los primeros monzones violentísimos en el Mioceno tardío.

Nuevo éxito de la ingeniería genética. Se ha conseguido que el alcaloide mortal hiosciamina producido por la belladona (*Atropa belladonna*) se convierta en escopolamina, alcaloide de uso terapéutico, mediante la inserción de genes adicionales que determinan la enzima hidroxilasa. Además resulta fácil su extracción y su separación, por cromatografía, de otros alcaloides.

Podría haber solución para deshacer la contradicción manifiesta entre el registro del polen y la observación geomorfológica de la edad del hielo en la cuenca mediterránea; la paleopalinología aporta una vegetación esteparia de *Artemisa*, que corresponde a unas condiciones de semiaridez, en tanto que la geomorfología revela la existencia de niveles muy altos en lagos y lagunas. Unas y otras pruebas se tornan compatibles en un modelo que admite un régimen de veranos secos e inviernos húmedos con anomalías térmicas estacionales similares al atribuido al último máximo glacial.

Cuando una hipótesis deja demasiados flecos, o vacíos importantes, conviene pensar en otra. Era la oficial hasta ahora que los gases nobles de los planetas terrestres tenían un origen meteorítico, pero las condritas responsables poseen xenón, del que carecen las atmósferas de Marte y la Tierra; además, la concentración de neón y argón por gramo de roca en Venus supera la habitual en las condritas carbonáceas. Aporías que no aparecen si se atribuye la fuente de esos gases nobles a impactos de cometas, la nueva hipótesis.